



Università degli Studi di Napoli Federico II

Scuola di Dottorato in Ingegneria Industriale

Corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici - XXVIII Ciclo

Titolo della Tesi

Ottimizzazione del sistema edificio-impianto: tecniche passive ed attive per la riduzione della richiesta energetica, dei costi di gestione e dell'impatto ambientale

Coordinatore della Scuola di Dottorato

Prof. Ing. Antonio Moccia

Coordinatore del Corso di Dottorato

Prof. Ing. Fabio Bozza

Relatore

Prof. Ing. Francesco Minichiello

Candidata

Concetta Marino



University of Naples Federico II

School of Doctorate in Industrial Engineering

Research Doctorate in Mechanical System Engineering - XXVIII Cycle

Title

Optimization of the building-plant system: passive and active solutions for reducing the energy requirements, the management costs and the environmental impact

School of Doctorate Coordinator
Prof. Ing. Antonio Moccia

Doctorate Program Coordinator
Prof. Ing. Fabio Bozza

Tutor
Prof. Ing. Francesco Minichiello

Candidate
Concetta Marino

“...Ma il Gabbiano Jonathan Livingston, intrepido, pronto a tendere le ali un'altra volta in quella complicata torsione che lo faceva tremare tutto – rallenta, rallenta, e va di nuovo in stallo – non era un uccello come gli altri. Un gabbiano non si preoccupa di apprendere altro che l'abc del volo: come andare dalla riva al cibo e ritorno. Per un gabbiano l'importante non è volare, è mangiare.

Per quel gabbiano però l'importante non era mangiare, ma volare. Più di ogni altra cosa, il Gabbiano Jonathan Livingston amava volare. Quel genere d'idea, scoprì, non aiuta a diventare popolari tra gli altri uccelli. Perfino i suoi genitori erano costernati quando Jonathan passava giorni interi da solo, tentando centinaia di planate a bassa quota, sperimentando. Non sapeva come mai, per esempio, quando volava sull'acqua a un'altezza che era meno della metà della sua apertura alare riusciva a restare in aria più a lungo, con minor sforzo...

<<Perché, Jon, perché?>> gli chiese sua madre. <<Perché è tanto difficile essere come il resto dello Stormo, Jon?>>...<<Voglio solo sapere cosa posso fare e cosa non posso fare per aria, tutto qui. Voglio soltanto sapere>>...Per qualche giorno cercò di comportarsi come gli altri gabbiani; ci provò sul serio...Ma non ci riusciva proprio...E' tutto così inutile, si disse infine, lasciando cadere apposta l'acciuga per cui si era battuto verso un vecchio gabbiano affamato che lo inseguiva. Potrei usare tutto questo tempo per imparare a volare. Ci sono tante cose da imparare! ...La sua materia era la velocità, e in una settimana di sforzi imparò sulla velocità più cose del gabbiano più veloce al mondo. Da un migliaio di piedi, agitando le ali più che poteva, si lanciò in vertiginosa picchiata verso le onde, e imparò come mai i gabbiani non si lanciano in vertiginose picchiate...Salire a mille piedi. Avanti diritto, al massimo, poi prepararsi alla picchiata agitando le ali. E, poi, tutte le volte l'ala sinistra andava in stallo in fase ascendente...Riprovò da due mila piedi, rollando, poi in picchiata, il becco puntato in giù, le ali dispiegate e immobili dal momento in cui superò le cinquanta miglia all'ora. Gli ci volle una forza terribile, ma funzionò...Ma la vittoria fu di breve durata...Mentre sprofondava nell'acqua, dentro di lui echeggiò una strana voce sorda. Non c'è modo. Sono un gabbiano. Sono limitato dalla mia natura. La voce svanì, e Jonathan assentì...per lui, mettere in pratica l'amore voleva dire rendere partecipe della verità da lui appresa, conquistata, qualche altro gabbiano che a quella stessa verità anelasse...

Lui parlava di cose molto semplici. Diceva che è giusto che un gabbiano voli, essendo nato per la libertà, e che è suo dovere lasciar perdere e scavalcare tutto ciò che intralcia, che si oppone alla sua libertà, vuoi superstizioni, vuoi antiche abitudini, vuoi qualsiasi altra forma di schiavitù...

...Non dar retta ai tuoi occhi, e non credere a quello che vedi. Gli occhi vedono solo ciò che è limitato. Guarda col tuo intelletto, e scopri quello che conosci già, allora imparerai come si vola...

...Ed egli imparò a volare, e non si rammaricava per il prezzo che aveva dovuto pagare. Scopri che erano la noia e la paura e la rabbia a rendere così breve la vita di un gabbiano...

dal libro "Il gabbiano Jonathan Livingston" di Richard Bach

Sommario

Il clima sta cambiando. È questo l'allarme che occupa sempre con maggiore frequenza i titoli delle prime pagine di giornali e quasi sempre in occasione di eventi meteorologici disastrosi. "Il pianeta è malato". "Caporetto della terra". "Battaglia per la Terra, il clima è in pericolo" sono i titoli ed i toni di un giornale a diffusione nazionale dell'anno 2000.

Il cambiamento climatico, causato dalle attività antropiche, è parte costitutiva della secolare deriva verso un mondo non sostenibile. Di conseguenza, le strategie energetiche volte a ridurre le emissioni nocive in atmosfera corrispondono alla principale leva, che dispone l'umanità intera, per la creazione di un "sistema sostenibile".

Pietra miliare nella lotta internazionale ai cambiamenti climatici è stato il Protocollo di attuazione svolto a Kyoto dal 1 al 10 dicembre 1997, durante la Terza Conferenza delle parti, ed aperto alla firma il 16 marzo 1998.

Con il passare degli anni, si è giunti al "pacchetto clima-energia 20-20-20", ossia un portfolio di provvedimenti con cui l'Unione Europea conferma la volontà degli Stati Membri di continuare ad impegnarsi nel processo negoziale per la lotta al cambiamento climatico post-Kyoto, nel periodo 2013-2020.

Pertanto, ogni provvedimento in materia di risparmio energetico ed ambientale non può prescindere dal fatto che l'energia richiesta dal settore residenziale e terziario europeo rappresenta circa il 40% del consumo finale della comunità europea. È da tale constatazione che, oltre un decennio fa, è stata emanata la Direttiva 2002/91/CE, "*Energy Performance of Buildings*" (EPBD), sul rendimento energetico in edilizia, integrata e modificata dalla Direttiva 2010/31/UE, "*EPBD recast*" del 19 maggio 2010, oggi ritenuta il cardine per gli attuali obiettivi di efficienza energetica in edilizia.

L'attività di ricerca, maturata durante i tre anni di Dottorato, ha l'intento di promuovere lo sviluppo e la diffusione di materiali innovativi, soluzioni tecniche e tecnologie finalizzate ad ottimizzare gli effetti delle scelte progettuali su:

- consumi di energia primaria;
- emissione di gas ad effetto serra in atmosfera;
- costi di gestione dell'organismo edilizio;
- comfort termico.

Il titolo del lavoro di Tesi è il seguente "*Ottimizzazione del sistema edificio-impianto: tecniche passive ed attive per la riduzione della richiesta energetica, dei costi di gestione e dell'impatto ambientale*".

Il lavoro di tesi si articola in 6 capitoli:

1. Il legame tra sviluppo, energia e clima
2. L'efficienza energetica in edilizia nel contesto legislativo europeo: il "pacchetto clima-energia 40-27-27" per il 2030
3. Il contesto energetico-ambientale in Italia
4. Simulazione energetica degli edifici in regime stazionario e dinamico
5. Attività di ricerca

6. Conclusioni

Il principale fine dell'attività di ricerca è stato la valutazione di strategie passive ed attive finalizzate alla minimizzazione dei consumi di energia primaria e, quindi, dei costi di gestione e dell'impatto ambientale, ed al miglioramento delle condizioni di comfort termico all'interno degli ambienti, sia con riferimento ad edifici di nuova costruzione che soprattutto alla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente. Ciò è stato effettuato mediante l'ausilio di codici di simulazione energetica, soprattutto in regime dinamico.

Un altro scopo della tesi è stato quello di estendere l'attività di ricerca ad edifici di nuova costruzione e ad edifici rappresentativi del parco edilizio esistente sia per tipologia costruttiva che impiantistica, con il fine di valutare le potenzialità e le criticità derivanti dall'applicazione a scala urbana di determinate azioni di ottimizzazione dell'efficienza energetica.

L'attività di tesi è stata suddivisa in macro-aree. Sono stati studiati:

- finiture superficiali innovative dell'involucro edilizio (par. 5.2);
- livello ottimale di isolamento termico (par. 5.3);
- scambiatori aria-aria e terra-aria inseriti in impianti di climatizzazione (par. 5.4);
- nZEBs (nearly Zero Energy Buildings, par. 5.5).

L'attuale legislazione richiede una progettazione integrata del sistema edificio-impianto. Pertanto, l'attività di studio ha previsto i seguenti step:

- minimizzazione della richiesta energetica dell'involucro edilizio, che rappresenta l'interfaccia di scambio termico tra l'ambiente esterno e quello interno;
- impiego di impianti (in particolari di climatizzazione) ad alta efficienza energetica;
- sfruttamento delle risorse energetiche rinnovabili.

A tale proposito, occorre menzionare che nell'immediato futuro, come sopra descritto, tutti gli edifici di nuova costruzione, a partire dal 1° gennaio 2021, dovranno essere nZEB, ossia *“Edifici ad altissima efficienza energetica, il cui fabbisogno basso o quasi nullo deve essere coperto in misura significativa da fonti energetiche rinnovabili”*.

Abstract

“The climate is changing”. This is an alarm frequently present on the first pages of newspapers. Climate change, caused by anthropic activities, is a constitutive part of the secular drift towards an unsustainable world. Consequently, efficacious energy strategies to reduce dangerous emissions into the atmosphere represent the base to create a "sustainable world".

In the last decades, the summer heat waves have increased and similar future weather events will be probably more severe. This leads to an increase of HVAC system use and of their energy requirements. A significant part of total energy consumption and pollutant gas emissions depends on buildings. In the European Union, about 40% of global energy consumption depends on buildings, and this sector is on the increase; moreover, in 2005, 26.6% of the final energy requirements depended on residential sector. Therefore, the European Union is engaged in diminishing energy consumption by 20%, with reference to 1990, within 2020. To this aim, all member states must increase the energy performance of new buildings and related systems and provide energy retrofit measures for existing buildings.

One of the challenges consists in improving the building energy efficiency while keeping a satisfactory indoor microclimate for the occupants. In temperate or hot climates, the use of summer air conditioning systems is spreading also in residential buildings, causing the increase in peak electric demand and blackouts.

Energy saving in buildings is typically achieved by a combination of active and passive techniques. The active ones are based on the utilization of renewable energy sources and energy efficient systems in buildings. Simultaneously, significant savings can be achieved by implementing passive techniques, mainly focused on the appropriate selection of the components of the building envelope.

The research activity developed during the Doctorate course has the aim of promoting the development and dissemination of innovative materials, technical solutions and technologies designed to optimize indoor thermal comfort and minimize primary energy consumption, emission of greenhouse gases into the atmosphere and building management costs.

The title of the dissertation is as follows: "Optimization of the building-plant system: passive and active solutions for reducing the energy requirements, the management costs and the environmental impact".

This thesis is divided into six chapters:

1. The relationship between development, energy and climate;
2. Energy efficiency in buildings in the European legislative framework: the "climate-energy package 40-27-27" for 2030;
3. The energy and environmental context in Italy;
4. The energy simulation of buildings in stationary and dynamic conditions;
5. Research activities;
6. Conclusions.

The main purpose of research activity has been the evaluation of passive and active strategies aimed at minimizing the consumption of primary energy, operating costs and environmental impact, and to improve indoor thermal comfort conditions, with regard to both new buildings and existing buildings. The research activity has been performed through the use of energy simulation codes, especially in dynamic regime.

Another aim of the work was to extend the research to new buildings and representative existing buildings, in order to evaluate the potential and critical issues arising from the application of energy efficiency optimization measures considering a urban scale.

The thesis work has been divided into macro-areas. The following topics were analyzed:

- Innovative surface finishes for the building envelope (par. 5.2);
- Optimal thickness of thermal insulation (par. 5.3);
- Air-to-air and earth-to-air heat exchangers in air-conditioning systems (par. 5.4);
- nZEBs (nearly Zero Energy Buildings, par. 5.5).

The current legislation requires an integrated design of the building-plant system. Therefore, the study activity has provided the following steps:

- minimization of the energy demand of the building envelope, which mainly depends on the heat exchange between the external environment and the internal one;
- use of energy efficient HVAC systems;
- exploitation of renewable energy resources.

In this regard, it should be mentioned that all new buildings, as of 1 January 2021, must be nZEBs (i.e., buildings with very high energy efficiency, whose low or almost zero energy requirements must be covered to a significant extent by means of renewable energy sources), according to European legislative framework.

INDICE

Introduzione.....	11
1. Il legame tra sviluppo, energia e clima.....	16
1.1 Contesto energetico-ambientale internazionale.....	16
1.2 Conseguenze ambientali.....	18
1.3 Sviluppo sostenibile.....	21
2. L'efficienza energetica in edilizia nel contesto legislativo europeo: il "pacchetto clima-energia 40-27-27" per il 2030.....	25
2.1 La Direttiva 2002/91/CE.....	25
2.2 La Direttiva 2010/31/EU.....	27
2.3 La Direttiva 2012/27/EU.....	28
2.4 Il nuovo "pacchetto clima-energia 40-27-27".....	30
2.5 Strategie europee per lo sviluppo sostenibile e la de-carbonizzazione.....	31
2.6 Le opportunità del Piano di efficienza energetica.....	32
3. Il contesto energetico-ambientale in Italia.....	34
3.1 Una priorità per lo sviluppo: l'efficienza energetica in edilizia.....	39
3.2 Dall'espansione al recupero, dalla quantità alla qualità. Risultati e potenzialità della riqualificazione edilizia.....	41
3.2.1 Il Rapporto CRESME 2014. Determinazione del mercato potenziale della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente.....	45
3.3 Strumenti finanziari.....	53
3.4 L'efficienza energetica in edilizia: il quadro legislativo.....	54
3.4.1 L'evoluzione legislativa: dal limite prescrittivo a quello prestazionale – D. Lgs. 192/05, D. Lgs. 311/06, ecc.	55
3.4.2 La Legge 90/2015.....	57
3.4.3 L'edificio di riferimento.....	61
3.4.3.1 Requisiti dell'edificio di riferimento in Italia.....	68
4 Simulazione energetica degli edifici in regime stazionario e dinamico.....	75
4.1 Metodi di calcolo dinamici.....	78
4.2 Inerzia termica degli edifici.....	81
4.3 Algoritmi di simulazione energetica dinamica: EnergyPlus.....	84
5 Attività di ricerca.....	90

5.1	Tematiche analizzate e metodologia utilizzata.....	90
5.2	Ottimizzazione dell'involucro edilizio mediante finiture superficiali innovative.....	92
5.2.1	Introduzione.....	92
5.2.2	Approccio metodologico.....	97
5.2.3	Caratteristiche radiative delle finiture superficiali innovative.....	100
5.2.4	L'incidenza delle finiture superficiali degli edifici residenziali esistenti sul fabbisogno energetico, sui costi di gestione e sull'impatto ambientale.....	103
5.2.4.1	Caso di studio.....	103
5.2.4.2	Risultati energetici.....	107
5.2.4.3	Analisi tecnico-economica.....	114
5.2.4.4	Impatto ambientale in termini di emissioni di CO ₂	117
5.2.5	Valutazione degli effetti della massa e delle finiture superficiali.....	119
5.2.6	Valutazione dei livelli termici al variare delle caratteristiche termiche dell'involucro edilizio e delle caratteristiche radiative delle finiture superficiali.....	127
5.2.7	Valutazione delle condizioni di comfort: il comfort adattivo.....	133
5.2.8	Il coating factor, un fattore per ottimizzare la scelta delle finiture superficiali esterne ed interne.....	138
5.3	Ottimizzazione dell'involucro edilizio mediante l'indagine sul livello ottimale di isolante termico.....	142
5.3.1	Introduzione.....	142
5.3.2	L'edificio oggetto di indagine.....	146
5.3.3	Metodologia utilizzata ("Cost-optimal").....	147
5.3.4	Risultati conseguiti.....	153
5.3.5	Una proposta di integrazione al calcolo di base della metodologia "Cost-optimal".....	160
5.4	Ottimizzazione degli impianti di climatizzazione mediante l'inserimento di recuperatori di calore aria-aria o terra-aria.....	164
5.4.1	Introduzione.....	164
5.4.2	L'edificio oggetto di indagine.....	165
5.4.3	Scambiatori di calore aria-aria.....	167
5.4.4	Scambiatori di calore terra-aria.....	171
5.4.5	Risultati conseguiti e confronto tra le due tipologie di scambiatori.....	180

5.5	Ottimizzazione del sistema edificio-impianto: i nZEBs (“nearly Zero Energy Buildings”)	185
5.5.1	Introduzione.....	185
5.5.2	Approccio metodologico.....	187
5.5.3	Risultati conseguiti e confronto tra un impianto di ventilazione meccanica tradizionale (MVS) ed uno dotato di scambiatore di calore terra-aria (EAHX).....	191
5.5.3.1	Analisi energetica ed ambientale.....	191
5.5.3.2	Analisi delle prestazioni termiche.....	194
5.5.3.3	Caso con impianto di ventilazione meccanica tradizionale (MVS).....	195
6.	Conclusioni	198
	Riferimenti	205

Introduzione

Il clima sta cambiando. È questo l'allarme che occupa sempre con maggiore frequenza i titoli delle prime pagine di giornali e quasi sempre in occasione di eventi meteorologici disastrosi. “Il pianeta è malato”. “Caporetto della terra”. “Battaglia per la Terra, il clima è in pericolo” sono i titoli ed i toni di un giornale a diffusione nazionale dell'anno 2000.

Il cambiamento climatico, causato dalle attività antropiche, è parte costitutiva della secolare deriva verso un mondo non sostenibile. Di conseguenza, le strategie energetiche volte a ridurre le emissioni nocive in atmosfera corrispondono alla principale leva, che dispone l'umanità intera, per la creazione di un “sistema sostenibile”.

Il primo punto di incontro internazionale, in cui si focalizzò l'attenzione sulla protezione dell'ambiente naturale come condizione imprescindibile per lo sviluppo delle popolazioni umane attuali e delle generazioni future, è rappresentato dalla Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente Umano UNCHE (United Nations Conference on Human Environment), tenutasi a Stoccolma nel 1972, che si concluse con l'adozione di tre documenti, quali: la Risoluzione relativa ad accordi istituzionali e finanziari, il Piano d'azione e la Dichiarazione di principi sull'ambiente umano detta “Dichiarazione di Stoccolma”, contenente i principi per la protezione ambientale e lo sviluppo umano cui i governi devono attenersi nelle proprie decisioni politiche.

La Dichiarazione afferma che la capacità dell'uomo di trasformare l'ambiente può apportare benefici, ma, se tale capacità non viene impiegata nel migliore dei modi, può arrecare un danno incalcolabile ad esso ed all'ambiente, come quelli già verificatisi in quegli anni:

- livelli paurosi di inquinamento dell'acqua, dell'aria, del suolo e dei viventi;
- sconvolgimenti dell'equilibrio ecologico della biosfera;
- esaurimento di risorse non rinnovabili;
- situazioni dannose per la salute fisica, mentale e sociale dell'uomo e degli ambienti umani.

Alla Conferenza di Stoccolma seguì, nel 1979, la Conferenza di Ginevra, che vide il lancio di un primo programma mondiale sul clima - WCP (World Climate Programme) - e furono sanciti accordi parziali sull'inquinamento atmosferico tra alcuni Paesi partecipanti. Dunque, il problema del mutamento climatico era, già alla fine degli anni '70, una delle maggiori preoccupazioni.

Nel periodo antecedente gli anni '80 le teorie economiche consideravano la tutela ambientale e lo sviluppo produttivo come un ossimoro; difatti fu la commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo WCED (World Commission on Environment and Development) a produrre, nel 1987, il “Rapporto Bruntland” intitolato “Il futuro di tutti noi” (Our common future), teorizzando che ogni politica di sviluppo deve essere in grado di favorire la tutela ambientale. Essenzialmente, da tale rapporto trae le sue origini il concetto di “sviluppo sostenibile”, che introduce il concetto di “bisogno”, ovvero l'importanza di mantenere uno standard accettabile di vita per tutte le popolazioni in termini di cibo, vestiario, ed implica dei “limiti”, ovvero la capacità dell'ambiente di soddisfare le necessità del presente senza compromettere quelle del futuro.

Pietra miliare nella lotta internazionale ai cambiamenti climatici è stato il Protocollo di attuazione svolto a Kyoto dal 1 al 10 dicembre 1997, durante la Terza Conferenza delle parti, ed aperto alla firma il 16 marzo 1998. Con esso si ha il primo esempio di trattato legalmente

vincolante in quanto, ai sensi dell'art. 24, esso è soggetto *“alla ratifica, accettazione o approvazione degli Stati e delle organizzazioni regionali di integrazione economica che sono Parti della Convenzione”*.

L'art. 2 sancisce che ogni Parte al fine di promuovere lo sviluppo sostenibile dovrà applicare ed elaborare *“politiche e misure in conformità con la sua situazione nazionale, come: miglioramento dell'efficacia energetica in settori rilevanti dell'economia nazionale...ricerca, promozione, sviluppo e maggiore utilizzazione di forme energetiche rinnovabili, di tecnologie per la cattura e l'isolamento del biossido di carbonio e di tecnologie avanzate ed innovative compatibili con l'ambiente...”*

Il successivo art. 3 obbliga alle “Parti” ad assicurare *“individualmente o congiuntamente che le loro emissioni antropiche...dei gas ad effetto serra...non superino le quantità che sono loro attribuite... al fine di ridurre il totale delle emissioni di tali gas almeno del 5,2% rispetto ai livelli del 1990, nel periodo di adempimento 2008–2012”*.

Si ritiene opportuno citare anche l'art. 10 con il quale le Parti: *“Formuleranno, applicheranno, pubblicheranno ed aggiorneranno regolarmente i programmi nazionali e, se necessario, quelli regionali contenenti misure per mitigare i cambiamenti climatici e per facilitare un adeguato adattamento ad essi...coopereranno nella promozione di modalità efficaci per lo sviluppo, l'applicazione e la diffusione di tecnologie, di conoscenze tecniche, di pratiche e di processi ecologicamente compatibili con il cambiamento climatico, ed adotteranno tutte le misure necessarie per promuovere, facilitare e finanziare, se necessario, l'accesso a dette fonti o a trasferirle, in particolare verso i paesi in via di sviluppo...”*

Il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC), nel IV Rapporto “Climate Change, 2007”, ha sottolineato che per contenere l'aumento del riscaldamento della superficie terrestre entro il limite dei 2°C, oltre il quale il rischio di un collasso degli ecosistemi è molto alto, devono essere attuate adeguate azioni di riduzione delle emissioni di gas serra dell'ordine del 60-80 %, entro la fine del secolo. Questo significa che protrarre nel tempo la struttura energetica attuale diviene incompatibile con il futuro del nostro pianeta e, soltanto mediante adeguate azioni politiche e l'adozione di strategie tecniche, si potrà assicurare uno sviluppo sostenibile.

Si è giunti così al “pacchetto clima-energia 20-20-20”, ossia ad un portfolio di provvedimenti con cui l'Unione Europea conferma la volontà degli Stati Membri di continuare ad impegnarsi nel processo negoziale per la lotta al cambiamento climatico post-Kyoto, nel periodo 2013-2020.

Pertanto, ogni provvedimento in materia di risparmio energetico ed ambientale non può prescindere dal fatto che l'energia richiesta dal settore residenziale e terziario europeo rappresenta circa il 40% del consumo finale della comunità europea. È da tale constatazione che, oltre un decennio fa, è stata emanata la Direttiva 2002/91/CE, “*Energy Performance of Buildings*” (*EPBD*), sul rendimento energetico in edilizia, integrata e modificata dalla Direttiva 2010/31/UE, “*EPBD recast*” del 19 maggio 2010, oggi ritenuta il cardine per gli attuali obiettivi di efficienza energetica in edilizia.

L'Italia ha recepito quanto stabilito dalla politica europea con il D. Lgs. n. 192 del 19 agosto 2005 (*Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*), integrato e modificato dal D. Lgs. 311/2006 e reso operativo, nei suoi aspetti principali, dal D.P.R. 59/2009 e dal D.M. 26.06.2009 (Linee Guida Nazionali per la Certificazione energetica degli edifici).

Con il fine di evitare un aggravamento della procedura di infrazione nei confronti dell'Italia, a causa del mancato recepimento della direttiva 2010/31/UE, è stato emanato l'ultimo atto ufficiale dell'iter legislativo italiano in materia di efficienza energetica del parco edilizio italiano, il D.L. n. 63 del 4 giugno 2013 convertito nella L. n. 90, recante *“Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale”*. La L. n. 90/2013, con i relativi decreti attuativi, determina una modifica della metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, dei requisiti minimi e degli ambiti di intervento.

In particolare, a partire dal 31 dicembre 2018, gli edifici di nuova costruzione occupati e di proprietà delle pubbliche amministrazioni, e dal 31 dicembre 2020 tutti gli altri edifici di nuova costruzione dovranno essere ad energia quasi zero (nearly Zero Energy Building, nZEB). La nuova metodologia presuppone l'analisi del ciclo di vita economico di un edificio con la determinazione del livello ottimale di efficienza.

Da un sistema legislativo basato sul limite prescrittivo si è passati ad un sistema prestazionale in cui le prestazioni energetiche dell'edificio oggetto di studio sono confrontate con quelle di un edificio “target”, ossia un fabbricato di riferimento (Reference Building) nel quale vi sono impianti tecnici di riferimento caratterizzato dalla stessa geometria, localizzazione, orientamento, destinazione d'uso e condizioni al contorno, e con caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati conformemente all'Appendice all'Allegato 1, L. n. 90.

Il 26 giugno 2015 sono stati emanati i tre Decreti attuativi della L. 90/2013. Tali provvedimenti costituiscono un passo fondamentale per la diffusione dei nZEB in Italia e riguardano:

1. Decreto sui requisiti minimi e le metodologie di calcolo della prestazione energetica. Sostituisce il DPR 59/2009 e definisce i nuovi requisiti degli edifici in termini di prestazioni energetiche e le relative metodologie di calcolo. I nuovi requisiti minimi si applicano in due fasi: la prima dal 1/10/2015; la seconda, più restrittiva, dal 1/01/2019 per gli edifici pubblici e dal 1/01/2021 per tutti gli altri edifici. I requisiti sono diversi tra edifici di nuova costruzione ed edifici esistenti sottoposti a riqualificazione energetica;
2. Decreto sulla relazione tecnica di progetto. Adegua gli schemi di relazione tecnica di progetto al nuovo quadro normativo, in funzione delle diverse tipologie di opere: nuove costruzioni, ristrutturazioni importanti e riqualificazioni energetiche;
3. Decreto sulla certificazione energetica. Sostituisce il DM 26/06/2009 e definisce le nuove linee guida per la certificazione energetica degli edifici. Introduce l'APE (Attestato di Prestazione Energetica), che esprime la prestazione energetica globale dell'edificio e sarà unico per tutto il territorio nazionale, con una metodologia di calcolo omogenea, a cui le Regioni dovranno adeguarsi entro due anni. Le classi energetiche passano da sette a dieci, dalla A4 (la migliore) alla G (la peggiore).

Il Reference Building diviene, quindi, lo start-up per l'applicazione della metodologia innovativa imposta dal Regolamento delegato n. 244/2012 della Commissione Europea del 16 gennaio 2012.

L'obiettivo generale diviene quello di minimizzare il fabbisogno energetico degli edifici tramite una progettazione accurata del sistema edificio-impianto e di massimizzare lo sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili.

Ultimo punto di valenza strategica è l'obiettivo posto sul tema della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, in quanto oltre il 50 % di esso è stato edificato prima del 1976, ossia in un periodo in cui era assente la legislazione in materia di risparmio energetico.

Le principali cause in Italia che hanno indotto ad un processo edilizio, degli scorsi decenni, poco attento alla qualità edilizia e ad un utilizzo insostenibile degli impianti di climatizzazione e di riscaldamento sono:

1. boom edilizio degli anni '60 che ha indotto ad impiegare materiali e procedure di realizzazione del manufatto edilizio di scarsa qualità;
2. assenza di un'adeguata attività di manutenzione;
3. produzione di nuovi componenti svincolati dalla tradizione locale.

Secondo studi dell'Associazione Nazionale Costruttori Edili (ANCE), dal 2008 al 2013, gli investimenti in nuove costruzioni si sono ridotti del 54.2 %, mentre gli interventi di ristrutturazione crescono del 3 % ogni anno (+12.6% negli ultimi sei anni con gli incentivi fiscali sulla riqualificazione energetica).

Di rilevante importanza diviene intervenire sulla macro-scala urbana, in quanto l'entità e le peculiarità del patrimonio immobiliare italiano consentono di ottenere enormi benefici.

“L'Europa del 2050 sarà molto differente da quella di oggi, e questa differenza si evidenzierà più che altrove nel modo in cui faremo fronte alle nostre esigenze energetiche e nel rispetto che avremo per il mondo intorno a noi”: sono le parole con cui si è conclusa la comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo ed al Comitato delle Regioni.

L'attività di ricerca, maturata durante i tre anni di Dottorato, ha l'intento di promuovere lo sviluppo e la diffusione di materiali innovativi, soluzioni tecniche e tecnologie finalizzate ad ottimizzare gli effetti delle scelte progettuali su:

- consumi di energia primaria;
- emissione di gas ad effetto serra in atmosfera;
- costi di gestione dell'organismo edilizio;
- comfort termico.

Il titolo del lavoro di Tesi è il seguente *“Ottimizzazione del sistema edificio-impianto: tecniche passive ed attive per la riduzione della richiesta energetica, dei costi di gestione e dell'impatto ambientale”*.

Il lavoro di tesi si articola in 6 capitoli:

7. Il legame tra sviluppo, energia e clima
8. L'efficienza energetica in edilizia nel contesto legislativo europeo: il “pacchetto clima-energia 40-27-27” per il 2030
9. Il contesto energetico-ambientale in Italia
10. Simulazione energetica degli edifici in regime stazionario e dinamico
11. Attività di ricerca
12. Conclusioni

Il principale fine dell'attività di ricerca è stato la valutazione di strategie passive ed attive finalizzate alla minimizzazione dei consumi di energia primaria e, quindi, dei costi di gestione e dell'impatto ambientale, ed al miglioramento delle condizioni di comfort termico all'interno degli ambienti, sia con riferimento ad edifici di nuova costruzione che soprattutto alla

riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente. Ciò è stato effettuato mediante l'ausilio di codici di simulazione energetica, soprattutto in regime dinamico.

Un altro scopo della tesi è stato quello di estendere l'attività di ricerca ad edifici di nuova costruzione e ad edifici rappresentativi del parco edilizio esistente sia per tipologia costruttiva che impiantistica, con il fine di valutare le potenzialità e le criticità derivanti dall'applicazione a scala urbana di determinate azioni di ottimizzazione dell'efficienza energetica.

L'attività di tesi è stata suddivisa in macro-aree. Sono stati studiati:

- finiture superficiali innovative dell'involucro edilizio (par. 5.2);
- livello ottimale di isolamento termico (par. 5.3);
- scambiatori aria-aria e terra-aria inseriti in impianti di climatizzazione (par. 5.4);
- nZEBs (nearly Zero Energy Buildings, par. 5.5).

L'attuale legislazione richiede una progettazione integrata del sistema edificio-impianto. Pertanto, l'attività di studio ha previsto i seguenti step:

- minimizzazione della richiesta energetica dell'involucro edilizio, che rappresenta l'interfaccia di scambio termico tra l'ambiente esterno e quello interno;
- impiego di impianti (in particolari di climatizzazione) ad alta efficienza energetica;
- sfruttamento delle risorse energetiche rinnovabili.

A tale proposito, occorre menzionare che nell'immediato futuro, come sopra descritto, tutti gli edifici di nuova costruzione, a partire dal 1° gennaio 2021, dovranno essere nZEB, ossia *“Edifici ad altissima efficienza energetica, il cui fabbisogno basso o quasi nullo deve essere coperto in misura significativa da fonti energetiche rinnovabili”*.

Capitolo 1

Il legame tra sviluppo, energia e clima

“*Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu*”, frase formulata da Clausius, descrive il Secondo Principio della Termodinamica in una forma più universale, secondo la quale l’entropia del mondo tende verso un massimo.

Tale legge afferma che l’energia non evolve liberamente da una forma all’altra e che l’energia termica si trasferisce soltanto in direzione delle temperature decrescenti.

Il massimo di entropia corrisponde allo stato di equilibrio di un sistema, ovvero uno stato in cui l’energia è completamente degradata e non è più in grado di fornire lavoro.

Pertanto, l’universalità del principio dell’aumento entropico sostiene che l’energia subisce una degradazione da una parte all’altra dell’universo e che la sua disponibilità diminuisce nel tempo fino alla “Wärmetode”, ovvero la morte termica dell’universo, che porta alla morte dei sistemi biologici e degli ecosistemi mediante la distruzione della diversità.

1.1. Contesto energetico-ambientale internazionale

Secondo i dati forniti dal rapporto annuale della BP Statistical Review of World Energy, reso noto nel giugno 2014 [1] i consumi di energia e la produzione energetica sono aumentati per tutti i combustibili, raggiungendo livelli record (eccetto per la fonte nucleare).

In disaccordo con il significato di sviluppo sostenibile, la domanda energetica soddisfatta dai combustibili fossili è aumentata rapidamente rispetto alla loro capacità di rigenerarsi.

Ancora una volta, sono state proprio le economie emergenti ad aver dominato la crescita della domanda energetica, ossia la Cina, il maggior responsabile, seguita dagli Stati Uniti e dall’Europa.

	Energia Primaria, 2013 [Mtep]	Incidenza sul totale
Nord America	2786.7	21.9%
Sud America	673.5	5.3%
Europa ed Eurasia	2925.3	23%
Medio Oriente	785.3	6.2%
Africa	408.1	3.2%
Asia (Pacifico)	5151.5	40.5
Mondo totale	12730.4	100%
Unione Europea	1675.9	13.2%

Tabella 1.1.1: Consumo di energia primaria nel mondo, anno 2013 [1]

I consumi energetici mondiali del 2013 (Tab. 1.1.1), rispetto all'anno precedente, sono aumentati del 2.3 % e, rispetto all'anno 2003, sono incrementati del 21.9 % con andamenti fortemente contrastanti nei diversi Paesi.

In Europa, nel 2013, vi è stata una riduzione pari al 6.3 % della richiesta di energia primaria, rispetto a quella del 2003.

In particolare, tra le diverse fonti di energia, l'utilizzo del gas naturale e dell'energia rinnovabile è sempre più in espansione, mentre il petrolio sta progressivamente perdendo peso (dal ~45 % dell'energia primaria degli anni '70 a poco più del 30 % attuale ed al ~27 % previsto nel 2035).

La fase di rallentamento economico globale non consente facilmente di prevedere lo scenario energetico futuro.

È possibile far riferimento ai trends elaborati dall'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA), che prevede una crescita della domanda energetica del 35 % (al 2035), con una responsabilità differenziata dei vari Paesi. I Paesi in via di sviluppo, tra vent'anni, potrebbero rappresentare oltre il 60 % della domanda energetica globale.

Le maggiori preoccupazioni future riguardano non solo l'esauribilità di fonti fossili e gas naturale, ma anche la stabilità dei mercati e la sicurezza degli approvvigionamenti. Infatti, la vulnerabilità delle economie rispetto a possibili interruzioni di fornitura aumenterà di pari passo con il forte sviluppo del commercio internazionale dell'energia, poiché i nuovi giacimenti sono sempre più costosi da sfruttare.

Il consumo relativo all'Unione Europea (UE), osservato in dettaglio, mostra che il maggior settore di uso finale è quello civile (41 %), seguito dai trasporti (32 %) e dall'industria (25 %) [2].

L'IEA ha pubblicato nel 2011 [3] uno studio che integra le tendenze energetiche globali con le politiche dei vari Paesi, ed indaga le conseguenze economiche-ambientali di tre scenari per il periodo 2010-2035.

La Fig. 1.1.1 mette in mostra gli effetti di tre diversi scenari politici sulla richiesta di energia primaria e di conseguenza sulle emissioni di CO₂ in atmosfera. Gli scenari politici sono i seguenti:

- scenario attuale, riferito all'anno 2011;
- scenario nuovo, con misure più restrittive e rispettate da ciascun Paese;
- scenario ottimista, che segue quanto consigliato dagli esperti in climatologia più conservatori.

Prendendo in considerazione, invece, i dati forniti dall'European commission, Joint Research Centre, Emission Database for Global Atmospheric Research (EU JRC EDGAR) [4], è possibile notare l'andamento delle emissioni di CO₂ globale in atmosfera (Fig. 1.1.2). Da questa figura si evince che i Paesi con maggiori livelli di emissioni nocive in atmosfera sono quelli che, come visto già in precedenza, presentano maggiori richieste di energia, ovvero: China, Stati Uniti ed Europa.

In Europa, il rallentamento economico dopo il 2008 ha influenzato molto la tendenza delle emissioni. Nel 2013, il nostro Paese, è stato investito da una crescita economica lenta; difatti, il PIL in quell'anno è aumentato solo del 0.1 %, rispetto al 2012, e le emissioni di CO₂ sono diminuite del 1.4 %.

La quota di emissioni globali di CO₂ dell'Europa nel 2013 è stata pari al 10.6 % e si è distribuita tra i Paesi maggiormente contributori nel seguente modo: Germania (2.4 %), Regno Unito (1.3 %), Italia (1 %) e Francia (1 %) [4].

1.2. Conseguenze ambientali

Il clima sta cambiando. È questo l'allarme che occupa sempre con maggiore frequenza i titoli delle prime pagine di giornali e quasi sempre in occasione di eventi meteorologici disastrosi. “Il pianeta è malato”. “Caporetto della terra”. “Battaglia per la Terra, il clima è in pericolo” sono i titoli ed i toni di un giornale a diffusione nazionale [5].

Per clima, a livello globale, deve intendersi lo stato di equilibrio energetico tra il flusso totale di energia entrante nel Pianeta, l'energia radiante solare, ed il flusso totale uscente, la radiazione solare riflessa dall'atmosfera, dal suolo, dalle nubi, ed in parte irraggiata dalla Terra. Purtroppo, tale equilibrio viene minacciato dal rilascio in atmosfera di gas denominati “clima-alteranti”, che nel loro complesso aumentano la capacità termica del Pianeta, ovvero la capacità di trattenere l'energia termica.

Pertanto, tutto il sistema tende a raggiungere nuovi equilibri e, quindi, il clima tende a mutare.

L'aria atmosferica, respirata dagli esseri viventi, è una miscela di componenti gassosi e di altre sostanze, in genere inquinanti, che possono presentarsi in fase aeriforme (fumi), o come particelle solide in sospensione (polveri, polluzioni) [6].

L'atmosfera, ovvero l'involucro gassoso che avvolge il pianeta Terra, costituita da più strati, quali la Troposfera, la Stratosfera, la Mesosfera, la Ionosfera e la Esosfera ha una composizione volumetrica media al livello del mare in cui prevale per l'80 % circa l'azoto e l'ossigeno approssimativamente per il 20 %, riportata in Tab. 1.2.1.

Globalmente l'atmosfera assorbe direttamente il 25 % dell'energia proveniente dal sole, mentre il 45 % viene assorbita dalla superficie terrestre e distribuita nel seguente modo: dal suolo (16 %), dissipata dall'evaporazione dell'acqua marina (24 %) e dal trasporto delle particelle mosse dal vento (5 %).

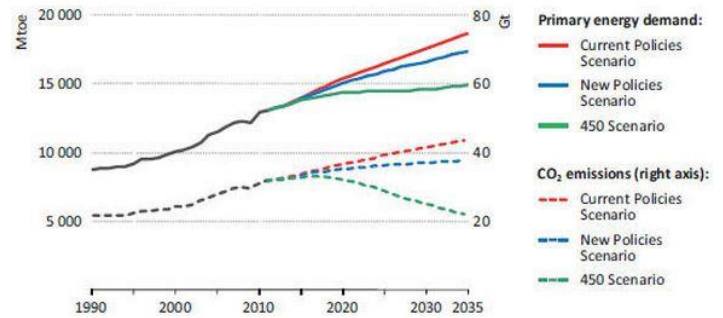


Fig. 1.1.1: Andamento della domanda di energia e primaria e delle emissioni di CO₂ in atmosfera [3]

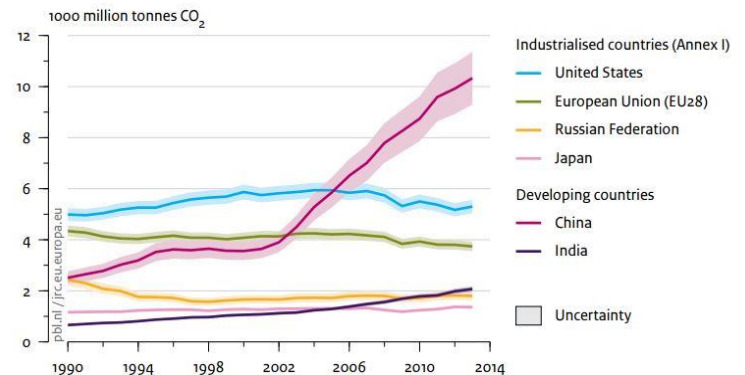


Fig. 1.1.2: Andamento delle emissioni cumulative di CO₂ [4]

COMPONENTE		PERCENTUALE IN VOLUME
Azoto	N ₂	78,084
Ossigeno	O ₂	20,9476
Argon	Ar	0,934
Anidride carbonica	CO ₂	0,0314
Neon	Ne	0,001818
Elio	He	0,000524
Metano	CH ₄	0,00015
Kripton	Kr	0,000114
Idrogeno	H ₂	0,00005
Ozono	O ₃	0,00005
Xenon	Xe	0,0000087

Tab. 1.2.1: Composizione volumetrica media dell'aria atmosferica al livello del mare [6]

Infine, il 30 % viene riflessa dalle nuvole (25 %) e da neve e ghiacciai (5 %).

L'energia assorbita dal terreno e dagli oceani viene a sua volta riemessa in atmosfera sottoforma di radiazione infrarossa e tende a sfuggire verso lo spazio esterno. Di essa soltanto il 4 % viene irradiata direttamente nello spazio a causa della presenza di sostanze, che assorbono per una quota pari al 100 % la radiazione infrarossa, e che a loro volta la emettono (88 %) in tutte le direzioni, impedendo che il calore venga diffuso nello spazio, provocando in tale modo il riscaldamento dell'atmosfera a partire dagli strati più vicini al suolo (Fig. 1.2.1).

Proprio come i vetri di una serra, quindi l'atmosfera è trasparente all'energia radiante proveniente dal sole e parzialmente opaca alla radiazione infrarossa derivante dalla superficie terrestre.

I gas che assorbono la radiazione termica sono detti “gas serra” e sono i responsabili del riscaldamento del pianeta. È proprio grazie a questo fenomeno che la temperatura media della Terra si aggira intorno ai 15 °C (che altrimenti in assenza sarebbe inferiore di 33 °C, ovvero pari a -18 °C) [7].

L'aumento della concentrazione dei gas ad effetto serra nell'atmosfera, nel corso dei processi di combustione e di altre attività antropiche, dunque, “intrappolerà” una parte crescente dei raggi infrarossi emessi dalla superficie terrestre, e la loro energia produrrà di conseguenza un riscaldamento sempre più marcato dell'atmosfera causando il cosiddetto effetto serra antropogenico.

Ormai è noto il consenso scientifico sulla certezza dei cambiamenti climatici e sulla sua principale causa, ovvero la dipendenza energetica mondiale dalle fonti energetiche di origine fossile combuste per soddisfare circa l'80 % del fabbisogno energetico mondiale, che determina l'emissione di grandi quantità di anidride carbonica, la quale sta alterando pericolosamente il clima del pianeta.

Per la prima volta, nel 1990, il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) delle Nazioni Unite, pubblicò un suo allarmato rapporto sul clima e, nel 1995, avanzò la diagnosi di un “processo irreversibile in atto” e come conseguenza delle sostanze scaricate dai processi produttivi e dai mezzi di trasporto, soprattutto dell'anidride carbonica, prevede un riscaldamento dell'atmosfera tra 1 e 3.5 °C per il 2100.

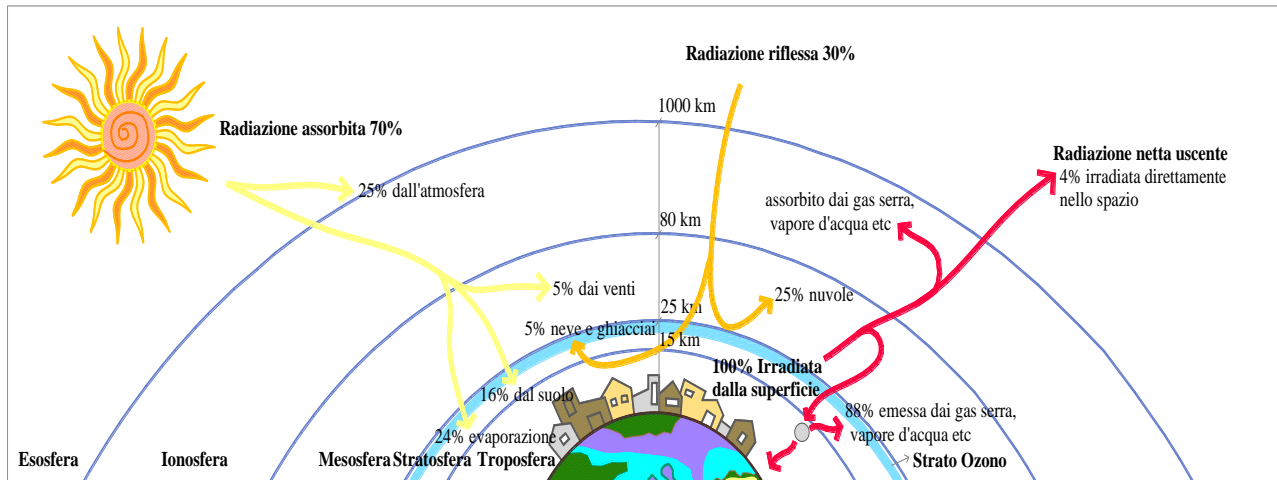


Fig. 1.2.1: Schema dell'effetto serra, con le percentuali di radiazione assorbita e riflessa, intendendo con radiazione netta uscente la differenza tra la contro-radiazione e la radiazione emessa dal suolo.

In ambito internazionale, la preoccupazione dovuta alle alterazioni climatiche e la consapevolezza della dipendenza da fonti energetiche esauribili ha portato alla United Nations Conference on Environment and Development (UNFCCC), nota come “Earth Summit”, tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992, dove i Paesi partecipanti hanno sottoscritto un piano di azione per la realizzazione dello sviluppo sostenibile proiettato nel XXI secolo. In questo piano di azione, chiamato “Agenda 21” (Agenda di azioni per il XXI secolo) erano contenute indicazioni di natura programmatica che, oltre a trattare i grandi problemi ambientali, cercassero di formulare delle raccomandazioni che potessero coniugare i cosiddetti “tre pilastri dello sviluppo”: **economia, ambiente e società**.

Il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), nel IV Rapporto “Climate Change, 2007”, ha sottolineato che le continue emissioni di gas ad effetto serra in atmosfera inducono ad un alto rischio di collasso degli ecosistemi. In tale rapporto, oltre ad essere confermate le indicazioni presenti nel rapporto del 2001, viene stimato che l'incidenza del fattore antropico sull'innalzamento della concentrazione dei gas serra in atmosfera sale dal 66 % al 90 %. Per contenere l'aumento del riscaldamento della superficie terrestre entro il limite dei 2 °C devono essere attuate adeguate azioni di riduzione delle emissioni di gas serra dell'ordine del 60-80 % entro la fine del secolo [8].

Gli effetti principali dell'aumento dell'anidride carbonica in atmosfera essenzialmente sono tre:

- aumento della temperatura media del Pianeta Terra;
- stravolgimento della circolazione dell'atmosfera;
- spiccata instabilità climatica.

Da quanto sopra riportato si evince che, protrarre nel futuro gli attuali stili di vita con i prevedibili aumenti delle richieste energetiche e delle emissioni, non è compatibile con il futuro del nostro Pianeta. Pertanto, solo con adeguate soluzioni ed azioni supportate da opportune decisioni politiche si potrà invertire l'attuale tendenza ed assicurare uno “**sviluppo sostenibile**”.

1.3. Sviluppo sostenibile

Il principale responsabile delle attuali condizioni di degrado dello scenario ambientale, dei danni al paesaggio ed alla salute dell'uomo, delle alterazioni degli equilibri ecologici e dell'ineguaglianza sociale è rappresentato dallo sviluppo, che non è stato in grado di garantire, mediante l'innovazione e la tecnologia il benessere, l'abbondanza, la giustizia e la pace.

Il cambiamento climatico, causato dalle attività antropiche, è parte costitutiva della secolare deriva verso un mondo insostenibile. Di conseguenza, le strategie energetiche volte a ridurre le emissioni di anidride carbonica corrispondono alla principale leva, che dispone l'umanità intera, per la creazione di un mondo contraddistinto dallo sviluppo sostenibile.

Fu la commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo WCED (World Commission on Environment and Development) a produrre, nel 1987, il "Rapporto Brundtland" intitolato "Il futuro di tutti noi" (Our common future), teorizzando che ogni politica di sviluppo deve essere in grado di favorire la tutela ambientale. Venne così definito lo sviluppo sostenibile come quello sviluppo *"...in grado di soddisfare i bisogni dell'attuale generazione non compromettendo la possibilità delle future generazioni di soddisfare i propri"* [9]. Ciò non significa rinunciare al benessere ed allo sviluppo culturale e tecnologico, ma garantirlo senza minacciare irreversibilmente le risorse del pianeta.

Lo "sviluppo" implica cambiamento, alterazioni e quindi instabilità; mentre la "sostenibilità" rinvia un po' all'idea di conservazione nel tempo delle condizioni esistenti, soprattutto nel lungo periodo.

Nella nozione sono incorporate tre dimensioni fondamentali, che dovrebbero co-esistere (Fig. 1.3.1):

1. dimensione economica;
2. dimensione ambientale;
3. dimensione sociale.

La teoria dello sviluppo sostenibile è nata come contrapposizione a quella della globalizzazione e le sue regole preziose sono dovute ad Herman Daly:

1. la velocità del prelievo delle risorse deve essere pari a quella di rigenerazione;
2. la velocità di produzione dei rifiuti deve essere uguale alla capacità naturale di assorbimento da parte degli ecosistemi in cui i rifiuti sono stati immessi;
3. la velocità di utilizzo delle risorse non rinnovabili non deve superare quella di rigenerazione delle risorse rinnovabili utilizzabili in alternativa [10].

Sostenibilità, dunque, vuol dire ascoltare le ragioni della natura.

Precisamente con il termine "sostenibile" si intende il nesso tra le dinamiche delle attività umane e la biosfera, che ha dinamiche molto più lente. Tali relazioni devono permettere alla vita di durare nel tempo, agli individui di soddisfare i propri bisogni ed alle diverse culture umane di svilupparsi.

L'uomo con la sua attività altera la natura, ma non devono essere superati certi limiti per non distruggere il contesto biofisico globale [11].

Lo sviluppo sostenibile non esiste se non si riesce a trovare un'integrazione tra le tre dimensioni.

La dimensione ambientale mette in evidenza che il funzionamento del sistema economico dipende da quello dell'ecosistema naturale. La sostenibilità ambientale si basa su un principio molto semplice: “soddisfare i bisogni con quello che l'ecosistema Terra è in grado di offrire”.

Tale dimensione si fonda sulla nozione di stabilità/resilienza. In generale, la stabilità può essere intesa come la capacità di un sistema di rimanere “stazionario”.

La parola “stazionario” introduce in economia le leggi della termodinamica, ma non contrasta lo sviluppo e la ricerca scientifica. “Stazionario” è lo sviluppo di un sistema, che si basa sui flussi naturali rinnovabili di energia e di risorse della natura, riducendo l'impiego delle risorse non rinnovabili. La sostenibilità ambientale cerca, dunque, di garantire la conservazione delle condizioni, che consentono alla vita di durare nel tempo, controllando gli effetti negativi delle attività dell'uomo sul capitale naturale: aria, acqua, suolo e biodiversità.

La dimensione sociale della sostenibilità molto spesso viene trascurata, anche se contribuisce alla stabilità ed alla resilienza del sistema, creando una maggiore cooperazione e riducendo i conflitti. Tale dimensione pone l'accento sulla necessità di migliorare le condizioni di vita attraverso un più opportuno accesso ai servizi; inoltre, risulta importante riconoscere che la presenza di diverse culture, crea un accostamento eterogeneo di straordinaria ricchezza, infatti “ciascuna è capace di dare risposte in modo univoco e diversificato, evitando comportamenti omologanti” [11]. Il pluralismo culturale consente di ridurre la competizione nell'uso di una stessa risorsa mentre, come sostenuto da Norgaard nel 1994, comportamenti omologati portano ad un sovra utilizzo della stessa risorsa ed il conflitto tra i vari soggetti.

Insomma, la sostenibilità sociale riconosce che la crisi dello sviluppo sta nella nostra mente, nei nostri valori e nella nostra cultura. È proprio la cultura ad essere la vera forza, che può guidare il cambiamento ed evitare l'involutione; infatti, il nostro futuro dipende dalla capacità di comprendere i limiti dell'attuale cultura e dal contributo che possiamo dare per promuovere un sistema di valori incentrati sull'efficienza, sulla competizione, ma anche sulla cooperazione e sulla responsabilità.

Infine, la dimensione economica ha come punto di partenza la ricerca della massima efficienza nell'uso dell'energia e delle risorse. Lo sviluppo non è sostenibile se nel tempo aumenta la povertà, per cui in tale area bisogna fare molta attenzione perché, come sostenuto da Rifkin nel 1995 [12], la crescita economica potrebbe provocare un aumento della disoccupazione.

Il principio di riferimento è “fare di più con meno”, cioè produrre gli stessi beni e servizi utilizzando meno risorse. In tale contesto, molto importante è la tecnologia, che permette di salvaguardare l'ambiente (come ad esempio la diffusione e l'utilizzo di apparecchiature a basso consumo energetico).

Il percorso che guida la generazione attuale verso uno sviluppo sostenibile, pertanto considera alcuni principi di fondo, che possono essere sintetizzati in tre punti:

1. il rispetto della capacità ricettiva dell'ambiente, che avviene ponendo dei limiti alle emissioni globali di sostanze inquinanti;
2. l'efficienza nell'uso delle risorse minerarie ed energetiche non rinnovabili, che si compie stabilendo delle quote minime di riserve naturali da destinare agli usi delle future generazioni;
3. consentire lo sviluppo dei paesi più poveri.

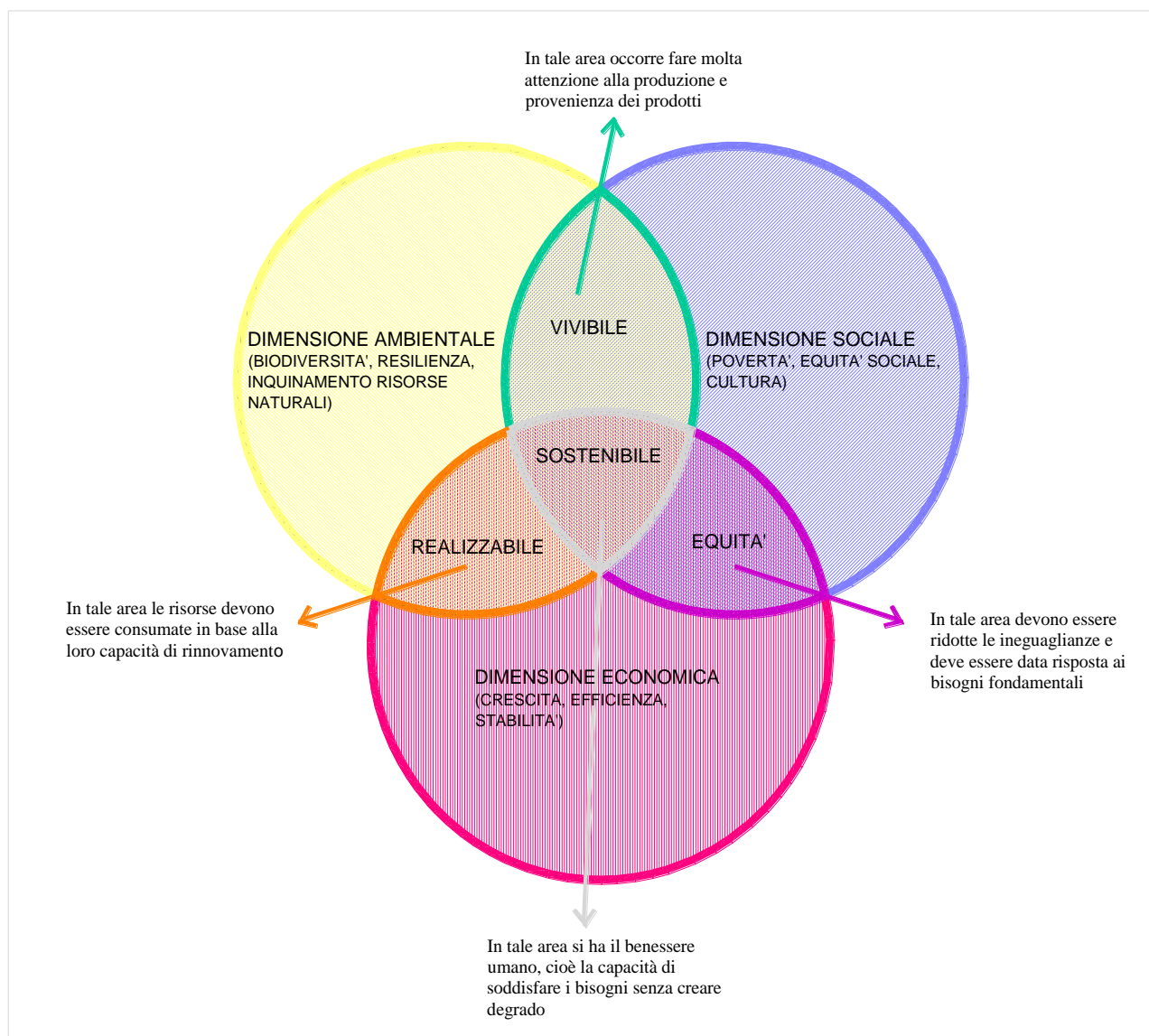


Fig. 1.3.1: Le tre dimensioni della sostenibilità

Negli anni, abbiamo potuto notare che l'economia cresce, divorando energia la quale sostiene l'attività umana, erodendo le risorse ecologiche ambientali attraverso i rifiuti della produzione e del consumo, e per sostenere il proprio sviluppo l'intero pianeta è costretto a bruciare enormi quantità di combustibili fossili, pagando un prezzo elevatissimo sia in termini di esaurimento delle risorse (depletion) che di crescente inquinamento (pollution).

Poiché i combustibili fossili vengono consumati con una velocità milioni di volte maggiori a quella di generazione, si stanno rivelando i principali responsabili del degrado ambientale, ovvero gli antipodi dello sviluppo sostenibile, determinando gravi conseguenze sulla salute dell'uomo, sulla fauna, sulla flora, e sul patrimonio artistico.

Pertanto, con il continuo incremento della domanda energetica si riducono progressivamente le riserve per le future generazioni, perciò occorre che l'uomo inizi a modificare il proprio pensiero ed a rivolgere la propria attenzione sulle risorse alternative.

Di fatto, potrebbe risultare interessante considerare il mondo come un'automobile ed il suo sviluppo come il motore; dunque, progettarlo come un congegno non basato sul carbone, petrolio e gas naturale, ma su quelle fonti energetiche alternative: “Il motore dello sviluppo sostenibile richiede energia pulita, economica, inesauribile” [13].

Come visto in precedenza, i dati forniti dal rapporto annuale della BP Statistical Review of World Energy, reso noto nel giugno 2014 [1], evidenziano che il consumo energetico attuale è aumentato a livelli record e, in disaccordo con il significato di sviluppo sostenibile, per ciascun combustibile fossile, il consumo globale è aumentato più rapidamente rispetto alla sua generazione.

Capitolo 2

L'efficienza energetica in edilizia nel contesto legislativo europeo: il “pacchetto clima-energia 40-27-27” per il 2030

La sfida di questi anni è quella di riuscire ad indirizzarsi verso una politica di sviluppo energeticamente consapevole. Questa sfida investe anche il settore edilizio, che contribuisce ad un notevole consumo energetico ed al conseguente cambiamento climatico.

Come ormai noto, la Direttiva 2002/91/CE ha evidenziato che: *“L'energia impiegata nel settore residenziale e terziario, composto per la maggior parte di edifici, rappresenta oltre il 40 % del consumo finale di energia della Comunità. Essendo questo un settore in espansione, i suoi consumi di energia quindi le sue emissioni di biossido di carbonio sono destinati ad aumentare”* [14].

2.1 La Direttiva 2002/91/CE

Sulla scia della prima crisi petrolifera del 1973, in Europa, si è cercato di normare l'isolamento termico degli edifici; infatti, in Svezia, Finlandia, Germania, Francia e Svizzera, da diversi anni, sono stati previsti standard di isolamento termico sempre più restrittivi e schemi di classificazione degli edifici sempre più rigorosi che mirano all'ottimizzazione dell'utilizzo delle risorse energetiche.

La Direttiva EPBD, emanata nel tentativo di dare indirizzi comuni ai vari Paesi membri, ha promosso lo sviluppo di uno strumento di salvaguardia ambientale in grado di ridurre le emissioni di anidride carbonica.

Nelle premesse sono stati introdotti vari temi, quali:

- tutela ambientale in conformità al Protocollo di Kyoto;
- sicurezza degli approvvigionamenti energetici;
- maturata consapevolezza che oltre il 40 % dei consumi finali di energia è attribuibile al settore delle costruzioni. Pertanto, occorre prevedere strategie volte alla riduzione dei consumi finali di energia attribuibile agli edifici;
- necessità di metodologie e di esperti qualificati;
- considerare la ristrutturazione importante una possibilità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici;
- definire delle azioni di risparmio energetico, che rispondano al criterio costi/efficienza;

- gli edifici pubblici dovrebbero essere esemplari nei confronti dell'ambiente e dell'energia. Tali edifici dovrebbero essere sottoposti alla certificazione energetica, prevedendo altresì l'affissione dell'attestato in luogo pubblico;
- considerare un parametro molto importante, ovvero la climatizzazione estiva che negli ultimi anni ha avuto uno sviluppo enorme nel sud Europa. Pertanto, dare priorità a quelle strategie che contribuiscono a migliorare l'efficienza energetica degli edifici in regime estivo, promuovendo lo sviluppo e l'uso di tecniche di raffrescamento passivo;
- importanza della manutenzione degli impianti, della loro corretta regolazione e della contabilizzazione in base agli effettivi consumi di energia.

Tale Direttiva può considerarsi una sorta di linea guida per le varie disposizioni legislative in materia di risparmio energetico, dei vari Stati Membri, e si è posta l'obiettivo di: *"...promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici nella Comunità, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni per quanto riguarda il clima degli ambienti interni e l'efficacia sotto il profilo dei costi..."* [14].

Gli strumenti attraverso cui la Direttiva Europea si propone di raggiungere tale obiettivo sono previsti dall'art. 1, che la identificano come il riferimento per raggiungere un prudente e razionale impiego dell'energia e per ridurre l'impatto ambientale del settore civile mediante l'incremento dell'efficienza energetica, sia degli edifici esistenti che di quelli ex-novo, e riguardano:

- l'applicazione di metodologie, da parte degli Stati Membri, sulla base di un quadro generale per il calcolo dell'efficienza energetica integrata degli edifici (art. 3 ed allegato);
- l'applicazione, da parte degli Stati Membri, di requisiti minimi in materia di efficienza energetica degli edifici di nuova costruzione e di quelli esistenti con superficie >1000 m² sottoposti ad importanti ristrutturazioni (artt. 4-5-6);
- la certificazione energetica degli edifici (art. 7) resa obbligatoria dal D.Lgs. 192/05 [15]. Viene specificato che la certificazione energetica riguarda i consumi di energia per il riscaldamento e la ventilazione dei locali, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la climatizzazione estiva e per l'illuminazione;
- l'ispezione periodica delle caldaie e dei sistemi di condizionamento d'aria negli edifici, nonché una perizia del complesso degli impianti termici le cui caldaie abbiano più di quindici anni (art. 8-9).

La procedura di certificazione deve identificare idonei indicatori delle prestazioni energetiche e suggerire appropriate misure di risparmio energetico.

In tale senso l'EPBD [14] suggerisce l'utilizzo di alcuni indicatori prestazionali, quali:

- dal punto di vista energetico: l'energia primaria, che consente di sommare più flussi e/o vettori energetici (combustibili fossili; combustibili come il metano, il gasolio, le biomasse ecc.; energia elettrica ricavata da fonti rinnovabili come la geotermia, l'idroelettrica, l'eolica ecc.);
- dal punto di vista ambientale, le emissioni di CO₂ che definiscono l'impatto ambientale dovuto al consumo di energia.

2.2 La Direttiva 2010/31/EU

In Europa, la direttiva EPBD, per il miglioramento dell'efficienza energetica in edilizia, ha dato il primo input ad una politica comunitaria finalizzata a promuovere ed accelerare le azioni di risparmio energetico, ed a definire diversi indirizzi, tra i vari stati dell'Unione Europea, per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici mediante alcune metodologie prefissate.

Tale direttiva, ritenuta fondamentale per conseguire gli obiettivi di efficienza energetica in edilizia, è stata recentemente aggiornata e sostituita dalla Direttiva 2010/31/UE, "Energy Performance of Buildings, EPBD- recast" del 19 maggio 2010 [16], cui si farà riferimento in questo lavoro.

Questa Direttiva prevede che gli Stati membri devono adottare una metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, che consideri le caratteristiche termiche dell'involucro edilizio, gli impianti di riscaldamento/climatizzazione e di produzione di acqua calda sanitaria, l'impianto di illuminazione e le condizioni climatiche ambientali interne. Inoltre, viene prevista l'introduzione di sistemi di misurazione intelligenti quando un edificio è in fase di costruzione, oppure nel momento in cui l'edificio è oggetto di una ristrutturazione importante.

I requisiti minimi di prestazione energetica, da adottare e rivedere ogni 5 anni, sono proiettati a conseguire dei livelli ottimali in funzione dei costi, ossia considerando i livelli di prestazione energetica che comportano il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato dell'edificio. I requisiti minimi potranno non essere applicati agli edifici tutelati per il loro valore architettonico/storico, oppure a quelli adibiti a luoghi di culto, ai fabbricati temporanei (tempo di utilizzo non superiore a due anni), ai siti industriali, alle officine, agli edifici agricoli non residenziali a basso fabbisogno energetico, agli edifici residenziali utilizzati meno di 4 mesi all'anno ed ai fabbricati indipendenti con superficie inferiore a 50 m².

Nel fissare i requisiti minimi, gli Stati membri possono distinguere i requisiti in funzione dell'oggetto su cui si interviene: edifici ex novo, edifici esistenti (tenendo conto anche della destinazioni d'uso).

Per gli edifici di nuova costruzione, gli Stati devono garantire che, prima dell'inizio dei lavori, sia valutata la fattibilità tecnica, ambientale ed economica di sistemi alternativi ad alta efficienza, eventualmente disponibili, tra cui: sistemi energetici basati su fonti energetiche rinnovabili, cogenerazione, teleriscaldamento o teleraffrescamento e pompe di calore.

Fondamentale è l'azione sugli edifici già esistenti, oggetto di ristrutturazioni importanti. Questi edifici devono subire un miglioramento della loro prestazione energetica in modo da poter soddisfare i requisiti minimi. Anche per i componenti edilizi, che vengono rinnovati o sostituiti, si devono rispettare i requisiti minimi in materia di prestazione energetica, in modo tale da poter raggiungere livelli ottimali in funzione dei costi.

Uno degli aspetti più importanti introdotti dalla EPBD recast sono gli edifici ad energia quasi zero (nZEB - Nearly Zero Energy Building), cioè *"Edifici ad altissima efficienza energetica, il cui fabbisogno basso o quasi nullo deve essere coperto in misura significativa da fonti energetiche rinnovabili"*.

In particolare, a partire dal 31 dicembre 2018, gli edifici di nuova costruzione occupati e/o di proprietà delle pubbliche amministrazioni, e dal 31 dicembre 2020 tutti gli altri edifici di nuova costruzione, dovranno essere concepiti secondo il concetto di nZEBs.

La nuova metodologia presuppone l'analisi del ciclo di vita economico di un edificio con la determinazione del livello ottimale di efficienza.

La direttiva sottolinea la necessità di mettere a disposizione adeguati strumenti di finanziamento ed incentivi per favorire l'efficienza energetica degli edifici ed il passaggio ai nZEBs.

Con riferimento alla certificazione di prestazione energetica, i vari Stati membri sono chiamati ad adottare un sistema di certificazione energetica degli edifici (valido 10 anni), che deve comprendere informazioni sulle prestazioni energetiche degli edifici, i valori di riferimento e le raccomandazioni per il miglioramento in funzione dei costi.

L'attestato di prestazione energetica deve essere rilasciato:

- per gli edifici o le unità immobiliari costruiti, venduti o locati;
- per gli edifici in cui una superficie di oltre 250 m² è occupata da enti pubblici e frequentata dal pubblico.

L'obbligo del rilascio del certificato viene meno ove sia già disponibile e valido un attestato rilasciato conformemente alla direttiva 2002/91/EC [14]. In caso di costruzione, vendita o locazione, l'attestato di prestazione energetica (APE) dovrà essere mostrato al potenziale acquirente o nuovo locatario e consegnato all'acquirente o al nuovo locatario.

In caso di vendita o locazione di un edificio o di un'unità immobiliare, l'indicatore di prestazione energetica deve essere riportato in tutti gli annunci dei mezzi di comunicazione commerciali. Invece, in caso di costruzione, vendita o locazione di un edificio o di un'unità immobiliare, l'attestato va mostrato al potenziale acquirente, o nuovo locatario, e consegnato all'acquirente, o al nuovo locatario.

Sono previste nella nuova direttiva ispezioni periodiche degli impianti di riscaldamento degli edifici dotati di caldaie con una potenza superiore a 20 kW e degli impianti di condizionamento d'aria con potenza superiore a 12 kW.

2.3 La Direttiva 2012/27/EU

Le conclusioni del Consiglio europeo di marzo 2007 hanno sottolineato la necessità di aumentare l'efficienza energetica nell'Unione in modo da raggiungere l'obiettivo di un risparmio della domanda energetica primaria dell'UE del 20 % entro il 2020.

Con il più recente provvedimento europeo in materia di efficienza energetica, Direttiva 2012/27/EU [17], viene stabilito un quadro comune di misure per raggiungere l'obiettivo principale relativo ad incrementare l'efficienza energetica del 20 % entro il 2020.

La Direttiva modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE, e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE.

Nella direttiva, viene evidenziata l'importanza della riqualificazione energetica degli edifici esistenti; infatti, l'art. 4 *“Ristrutturazioni di immobili”* prescrive che ogni Stato membro deve prevedere *“...una strategia a lungo termine per mobilitare investimenti nella ristrutturazione del parco nazionale di edifici residenziali e commerciali, sia pubblici che privati. Tale strategia comprende:*

a) una rassegna del parco immobiliare nazionale fondata, se del caso, su campionamenti statistici;

b) l'individuazione di approcci alle ristrutturazioni efficaci in termini di costi, pertinenti al tipo di edificio e alla zona climatica;

c) politiche e misure volte a stimolare ristrutturazioni degli edifici profonde ed efficaci in termini di costi, comprese profonde ristrutturazioni per fasi;

d) una prospettiva rivolta al futuro per guidare le decisioni di investimento dei singoli individui, del settore dell'edilizia e delle istituzioni finanziarie;

e) una stima fondata su prove del risparmio energetico atteso, nonché dei benefici in senso lato”.

L'art. 5 sottolinea la necessità di avere il “Ruolo esemplare degli edifici degli enti pubblici”. Dal 1° gennaio 2014 e per ogni anno a seguire, ciascuno Stato dovrà ristrutturare e rendere energeticamente efficiente (rispettando i requisiti minimi di prestazione energetica) il 3 % della superficie coperta utile totale degli edifici riscaldati e/o raffreddati di proprietà del governo centrale. La norma si applica, da luglio 2015, agli edifici con superficie utile superiore a 250 m². Inoltre, sempre da luglio 2015, ogni Stato deve rendere pubblico un inventario (un vero e proprio catasto energetico) degli edifici riscaldati e/o raffreddati del governo centrale con una superficie coperta utile superiore a 250 m². L'inventario deve contenere i seguenti dati:

- superficie coperta;
- prestazione energetica di ciascun edificio o dati energetici pertinenti.

In particolare, all'art. 7, la Direttiva prevede l'istituzione di un regime obbligatorio di efficienza energetica costituito dal meccanismo dei Certificati Bianchi: esso dovrà garantire il conseguimento di un risparmio energetico non inferiore al 60 % dell'obiettivo di risparmio energetico nazionale cumulato. Il restante volume di risparmio di energia sarà ottenuto attraverso le misure di incentivazione vigenti.

Un altro aspetto rilevante, fa riferimento all'art. 8 relativo agli Audit energetici ed ai sistemi di gestione dell'energia. Le grandi imprese, entro dicembre 2015, dovranno iniziare a dotarsi di un audit energetico, da aggiornare ogni 4 anni. Tale attività dovrà essere svolta in modo indipendente da esperti accreditati. Gli Stati membri devono adottare misure per promuovere la disponibilità, per tutti i clienti finali, di audit energetici di elevata qualità, efficaci in rapporto ai costi.

Per quanto riguarda il supporto economico, la Commissione prevede di assistere gli Stati membri nella messa a punto dei meccanismi di finanziamento. A loro volta gli Stati membri potranno istituire un fondo nazionale per l'efficienza energetica, destinato a sostenere iniziative nazionali in materia di efficienza energetica.

Il D.Lgs. 102/2014 ha recepito, in Italia, la Direttiva 2012/27/EU, stabilendo un quadro di misure per la promozione e il miglioramento dell'efficienza energetica tese al raggiungimento degli obiettivi nazionali di risparmio energetico al 2020. A tal fine, il Decreto delinea una serie di azioni finalizzate a superare gli ostacoli e le carenze del mercato che frenano l'efficienza nella fornitura e negli usi finali dell'energia. L'obiettivo nazionale consiste nella riduzione dei consumi di energia primaria di 20 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (Mtep) al 2020, pari a 15.5 Mtep di energia finale.

2.4 Il nuovo “pacchetto clima-energia 40-27-27”

Le proposte della Commissione avviano l'Europa verso il futuro.

Nel 2008 è stata presentata la Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo ed al Comitato delle Regioni “Due volte 20 per il 2020. L'opportunità del cambiamento climatico per l'Europa” che si conclude con un pensiero rivolto al futuro:

“L'Europa del 2050 sarà molto differente da quella di oggi, e questa differenza si evidenzierà più che altrove nel modo in cui faremo fronte alle nostre esigenze energetiche e nel rispetto che avremo per il mondo intorno a noi. Questa visione ispira oggi giorno un gran numero di europei, che si rendono conto della disponibilità di alternative e di stili di vita che consentono all'Europa di proseguire il proprio percorso di crescita e di occupazione prendendo al tempo stesso la guida degli sforzi globali per limitare il cambiamento climatico. Esistono anche nuove opportunità, nuove tecnologie che l'Europa è in grado di sfruttare, e nuove possibilità per i produttori e i fornitori”.

Il Consiglio Europeo, in tale Comunicazione, ha definito alcuni obiettivi principali che, con il pacchetto clima-energia, entrato in vigore nel 2009, ha indirizzato le azioni verso misure vincolanti finalizzate a raggiungere i c.d. “obiettivi 20-20-20”, ossia:

1. ridurre le emissioni di gas ad effetto serra di almeno il 20 % entro il 2020;
2. raggiungere entro il 2020 una quota di energie rinnovabili pari al 20 % del consumo dell'UE;
3. migliorare l'efficienza energetica del 20 % [18].

Attualmente, il Consiglio europeo ha approvato il “nuovo pacchetto clima-energia” con il quale dagli obiettivi 20-20-20 al 2020 l'Europa passerà ai c.d. obiettivi 40-27-27 al 2030 [19].

Il nuovo quadro di obiettivi del nuovo pacchetto clima-energia al 2030 prevede:

1. ridurre le emissioni di gas ad effetto serra di almeno il 40 %, rispetto ai livelli del 1990.
L'obiettivo è vincolante e dovrà essere raggiunto nel modo più efficace in termini di costi e sarà esteso sia ai settori in cui è valido il sistema di scambio di quote di emissioni (ETS) che in quelli non coperti da tale sistema;
2. raggiungere una quota di energie rinnovabili pari al 27 % del consumo dell'UE;
3. migliorare l'efficienza energetica del 27 %.

Gli obiettivi fissati al 2030 dovranno essere raggiunti nel pieno rispetto della libertà degli Stati membri di determinare il proprio mix energetico e non saranno tradotti in obiettivi vincolanti a livello nazionale, ovvero ciascuno Stato è libero di fissare propri obiettivi nazionali più elevati.

Pertanto, il secondo capitolo approfondisce il pensiero della Commissione europea, che rappresenta il fulcro delle attuali politiche internazionali.

Da quanto detto in precedenza, si evince che occorre aggiornare le politiche energetiche a livello globale per fronteggiare efficacemente le modificazioni del clima ed, a tal fine, è necessario un approccio integrato, operando sul lato dell'utilizzo dell'energia e su quello della produzione.

Tutto questo richiede di accelerare la transizione verso un'economia non più basata sui combustibili fossili, ma sull'incremento dell'efficienza – lato domanda e lato offerta – e sulle

fonti energetiche rinnovabili, contestualmente puntando a tecnologie pulite e ad emissioni tendenti a zero nell'impiego delle fonti fossili.

2.5 Strategie europee per lo sviluppo sostenibile e la de-carbonizzazione

L'UE, negli ultimi anni, è diventata leadership mondiale nel processo di riduzione delle emissioni nocive in atmosfera e, come visto nel paragrafo precedente, l'elemento chiave è stata l'approvazione nell'anno 2008 del *Pacchetto Clima-Energia* (pubblicato nella Gazzetta ufficiale del 5 giugno 2009) [18].

Un successivo documento fondamentale sull'utilizzo delle risorse in modo efficiente è rappresentato dalla Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni, COM (2011) 112 [20] con la quale si evidenzia che per contenere entro i 2 °C il riscaldamento globale del Pianeta Terra l'obiettivo principale dell'UE è ridurre le emissioni di gas serra dell'80-95 % entro il 2050, rispetto ai livelli del 1990.

Tale documento mette in mostra, nella Fig. 2.5.1, il percorso che, nei vari settori, indurrebbe ad una riduzione globale delle emissioni di gas serra pari all'80 % entro il 2050, pari al 60 % nel 2040 e pari al 40 % nel 2030.

La linea rossa, invece, identifica le emissioni dovute alle politiche attuali. In questo caso, le stime rivelano che nel 2009 le emissioni erano inferiori del 16 % rispetto al 1990. Soltanto se l'UE sarà in grado di dare piena attuazione alle politiche attuali, le emissioni si ridurranno del 20 % entro il 2020 e del 30 % entro il 2030, ma non consentirebbero di raggiungere l'obiettivo +20 % dell'efficienza energetica.

Dando piena attuazione al Piano di efficienza energetica COM (2011) 109 [21], che accompagna la COM (2011) 112 [20] e definisce le misure per raggiungere l'obiettivo di efficienza energetica del + 20 %, si potrà raggiungere, entro il 2020, una riduzione delle emissioni del 25 %.

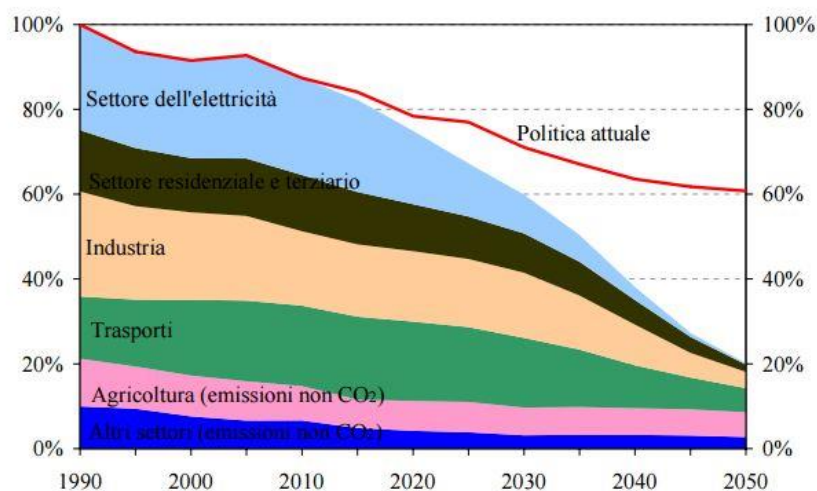


Fig. 2.5.1: Proiezione delle emissioni di gas serra dell'UE - verso una riduzione interna dell'80% (100% = 1990) [20]

Riduzioni dei gas serra rispetto al 1990	2005	2030	2050
Totale	-7 %	da -40 a -4 %	da -79 a -2 %
Settori			
Produzione di elettricità (CO ₂)	-7 %	da -54 a -8 %	da -93 a -9 %
Industria (CO ₂)	-20 %	da -34 a -0 %	da -83 a -7 %
Trasporti (incl. trasporto aereo, escl. Trasporti marittimi) (CO ₂)	+30 %	da +20 a -9 %	da -54 a -7 %
Settore residenziale e dei servizi (CO ₂)	-12 %	da -37 a -3 %	da -88 a -1 %
Agricoltura (emissioni diverse dal CO ₂)	-20 %	da -36 a -7 %	da -42 a -9 %
Altre emissioni diverse dal CO ₂	-30 %	da -72 a -3 %	da -70 a -8 %

Tab. 2.5.1: Riduzioni attese settoriali con le politiche di efficienza energetica [20]

Il documento, inoltre, esplora possibili piste di intervento per i settori più importanti, esaminando una serie di scenari basati su diversi tassi di innovazione tecnologica e prezzi dei combustibili fossili. Ne sono scaturiti risultati ampiamente convergenti per quanto riguarda l'entità delle riduzioni necessarie in ciascun settore nel 2030 e 2050, come si evince dai valori presentati in Tab. 2.5.1.

Da tale scenario si evince che un settore civile (residenziale e servizi) efficiente dal punto di vista energetico consentirebbe di ridurre le emissioni a breve termine ed a costi contenuti. Ad esempio, entro il 2050, il settore edilizio consentirebbe di minimizzare le emissioni di CO₂ di circa il 90 %.

Questo dato sottolinea l'importanza di conseguire l'obiettivo della Direttiva EPBD recast [16], ossia realizzare edifici ad altissima efficienza energetica, i nearly Zero Energy buildings (nZEBs), che presentano richieste energetiche prossime allo 0. Più complesso sarà, invece, intervenire sugli edifici esistenti, in quanto il finanziamento degli investimenti necessari rappresenta una sfida molto complessa.

I nuovi edifici dovrebbero essere sin d'ora progettati come edifici intelligenti a consumo di energia basso oppure nullo. I costi supplementari che comporta la realizzazione di edifici ad alta efficienza energetica possono essere compensati dai risparmi di energia conseguiti.

La ristrutturazione del parco immobiliare esistente ed in particolare il finanziamento degli investimenti, rappresentano una sfida molto più complessa. L'analisi della Commissione Europea, infatti, prevede che nel prossimo decennio occorrerà aumentare di 200 miliardi di euro gli investimenti in componenti e attrezzature per l'edilizia a basso consumo energetico.

Anche nel settore edilizio si potrebbe orientare il consumo di energia verso l'elettricità a bassa intensità di carbonio, prevedendo l'impiego di generatori di energia ad alta efficienza energetica (ad esempio le pompe a calore) e l'utilizzo di energia rinnovabile, in modo tale da proteggere i consumatori dall'aumento dei prezzi dei combustibili fossili e creare vantaggi significativi per la salute.

2.6 Le opportunità del Piano di efficienza energetica

Il Piano di efficienza energetica introdotto dalla Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle

Regioni, COM (2011) 109 [21] ha gli obiettivi di colmare le lacune esistenti per raggiungere l'obiettivo UE di risparmio energetico del 20 %, di contribuire alla realizzazione della visione europea del 2050 di un'economia basata su un uso efficiente delle risorse ed a basse emissioni di carbonio, e di rafforzare l'indipendenza energetica e la sicurezza dell'approvvigionamento energetico.

L'efficienza energetica intesa come l'utilizzo di meno energia, mantenendo lo stesso livello di attività, è la maggior risorsa energetica dell'UE. Essa rappresenta uno dei modi più efficaci, dal punto di vista economico, per rafforzare la sicurezza dell'approvvigionamento energetico e ridurre le emissioni di inquinanti nell'ambiente.

La piena attuazione delle misure (attuali e nuove) dovrebbe consentire risparmi energetici significativi. Pertanto, si potrà generare:

1. un risparmio di 1000 euro all'anno per famiglia, come indicato nella COM (2008) 772 [22];
2. il potenziamento della competitività dell'industria europea;
3. creare fino a 2 milioni di posti di lavoro;
4. ridurre di 740 milioni di tonnellate le emissioni annue di gas a effetto serra [23].

Nel documento sono mostrati i settori protagonisti delle azioni di efficienza energetica, ossia **l'edilizia, i trasporti e l'industria**.

Il maggiore potenziale di risparmio energetico è insito negli edifici. Il piano ha lo scopo di incentivare il processo di ristrutturazione di edifici sia pubblici che privati, di migliorare le prestazioni energetiche dei componenti edilizi e delle apparecchiature in essi installati. Evidenzia che il settore pubblico deve avere un “ruolo esemplare” nel campo dell'efficienza energetica in edilizia. Tale settore rappresenta il 12 % del patrimonio edilizio dell'UE [24]. La stima è basata sull'ipotesi di 5 m² di edifici pubblici per cittadino, risultando in una superficie al suolo totale degli edifici pubblici nell'UE pari a 2.5 miliardi di m² (esclusi gli alloggi sociali); mentre, la superficie al suolo complessiva del patrimonio dell'UE è di 21 miliardi di m² [23].

Anche questo documento sottolinea la necessità di aprire la strada ad edifici a basso consumo energetico ed evidenzia che *“Quasi il 40 % del consumo finale di energia è assorbito da case, uffici pubblici e privati, negozi e altri edifici...e nelle abitazioni residenziali due terzi di tale percentuale sono utilizzati per il riscaldamento di ambienti”*, Fig. 2.6.1.



Fig. 2.6.1: Consumo di energia nelle abitazioni dell'UE-27 relativo ai vari servizi [25]

Capitolo 3

Il contesto energetico-ambientale in Italia

In Italia, gli imputati responsabili del problema energetico-ambientale possono essere ricondotti ai seguenti:

1. il 50 % degli edifici è stato realizzato prima della L. 373/76 [26], presentando, dunque, pessime prestazioni energetiche;
2. l'attività edilizia marcatamente intensiva, nella seconda metà del secolo scorso, non è stata accompagnata al contempo da un'idonea attività manutentiva;
3. il boom edilizio è stato caratterizzato da imponenti fenomeni di abusivismo (negli anni '80 le stime ufficiali valutavano in più di 3 milioni gli alloggi abusivi) e, quindi, ad un'attività edilizia di scarsa qualità e realizzata in tempi molto brevi [27];
4. il processo industriale ha condotto alla realizzazione di nuovi materiali svincolati dalla tradizione locale (ciò ha favorito la progressiva scomposizione delle funzioni assolute in passato dall'involucro edilizio: di confine tra spazio interno ed esterno, e portante, divenendo così l'involucro che lega i vari elementi). La massa muraria, dunque con il passare del tempo è stata sostituita da superfici vetrate di dimensioni sempre maggiori; per tale motivo, oltre al tradizionale requisito statico si è affiancato quello di protezione e regolazione dei flussi termici e luminosi scambiati con l'ambiente esterno, per mezzo dell'introduzione di nuovi materiali.

Tutto ciò ha comportato ad un'attività edilizia:

1. volta al risparmio di risorse;
2. disinteressata alla qualità del costruito, prevedendo l'impiego di enormi quantità di cemento e di ridotte quantità di isolante termo-acustico, compromettendo, dunque, il comfort all'interno degli spazi confinati.

Tale evoluzione ha portato ad un periodo che può definirsi “indifferente” verso le problematiche ambientali ed energetiche e verso ad un massiccio impiego di risorse energetiche non rinnovabili.

Difatti, per anni si è mirato al conseguimento del comfort indipendentemente dai costi di gestione, dove materiali e tecnologie diversi operano insieme per offrire le qualità richieste, attraverso un forte ricorso ad impianti per il soddisfacimento di quelle esigenze sorte dall'abbandono dei materiali e delle tecnologie tradizionali.

Raggiungere gli obiettivi di risparmio energetico, di riduzione delle emissioni e di qualità del costruito non è facile, ma per avviare tale processo bisogna che gli strumenti attuativi della Pianificazione Urbanistica diventino incentivo e non vincolo per le scelte progettuali più innovative, garantendo, la “qualità energetica degli edifici”, attraverso norme volte a stimolare i progettisti a cercare soluzioni, ad integrare gli interventi di risparmio energetico con quelli di

riqualificazione tecnologica e chiudendo l'iter con la certificazione energetica del manufatto edilizio.

Si potrà così progettare il nuovo nel rispetto di regole chiare, ma anche intervenire sull'esistente, guardando allo sviluppo sostenibile del costruito.

Secondo dati del Ministero dello Sviluppo Economico, la domanda di energia primaria nel 2012 si è attestata intorno ai 178 Mtep (-3.5 % rispetto al 2011) [28]. Tale contrazione è stata determinata da diversi fattori, quali:

1. clima più mite;
2. regresso economico;
3. attuazione di politiche di efficienza energetica.

Il fabbisogno energetico complessivo nazionale, nel 2014, si è ulteriormente ridotto del 3.8 %, raggiungendo una quota pari a 166.43 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (Mtep), il livello più basso degli ultimi 18 anni.

La composizione percentuale delle fonti energetiche impiegate per la copertura della domanda, nel 2014, è stata caratterizzata, rispetto al 2013, dalla sostanziale stabilità del petrolio (dal 33.7 % al 34.4 %), dei combustibili solidi (dall'8.2 % all'8.1 %) e dalla diminuzione della richiesta del gas (dal 33.2 % al 30.5 %). Si registra, poi, un piccolo aumento dell'importazione netta di energia elettrica (dal 5.4 % al 5.7 %), mentre continua il trend crescente della quota delle fonti energetiche rinnovabili che passa dal 19.5 % al 21.2 %, Fig. 3.1 [29], Tab. 3.1.

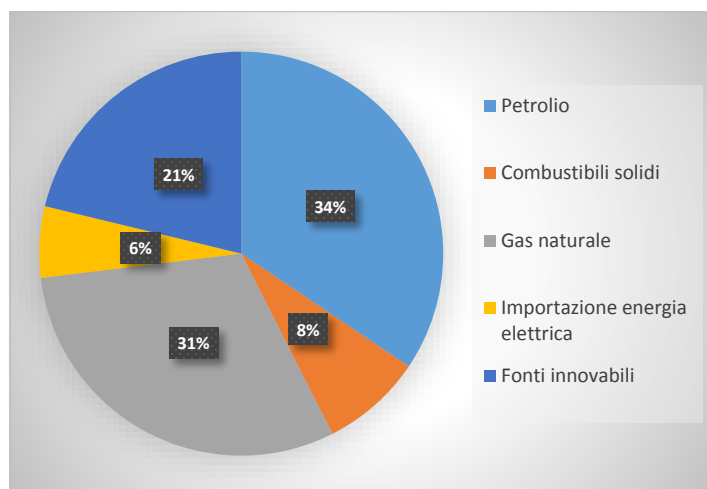


Fig. 3.1: Domanda energetica per fonte [29]

La riduzione del fabbisogno energetico, nell'anno 2014, è stato determinato dal regresso economico e dalla maggiore efficienza energetica.

La domanda di energia e la crescita economica hanno avuto un andamento analogo; infatti, dal 2012 al 2013 entrambi sono diminuiti con una conseguente stabilità dell'intensità energetica primaria. Nel 2014, a fronte di una flessione del PIL pari allo 0.4 %, è stato registrato un decremento della domanda complessiva di energia pari al 3.8 %, che ha determinato una maggiore diminuzione dell'intensità energetica rispetto agli anni precedenti, pari al 3.4 %.

	Solidi	Gas	Petrolio	Rinnovabili	Energia elettrica	Totale	Variazione % 2013-2014
	2.892	34.513	51.506	7.870	24.023	120.804	-4.6
Industria	2.821	11.876	3.863	0.036	9.114	27.709	-1.7
Trasporti		0.860	36.248	1.078	0.902	39.088	3.3
Usi civili	0.003	21.147	2.8	6.749	13.534	44.233	-10.7
Agricoltura		0.123	2.091	0.007	0.473	2.694	-1.5
Usi non energetici	0.068	0.508	4.204			4.780	-19.1
Bunkeraggi			2.3			2.3	-5.4

Tab. 3.1: Consumi finali di energia per settore (Mtep). *Elaborazione da dati [29]*

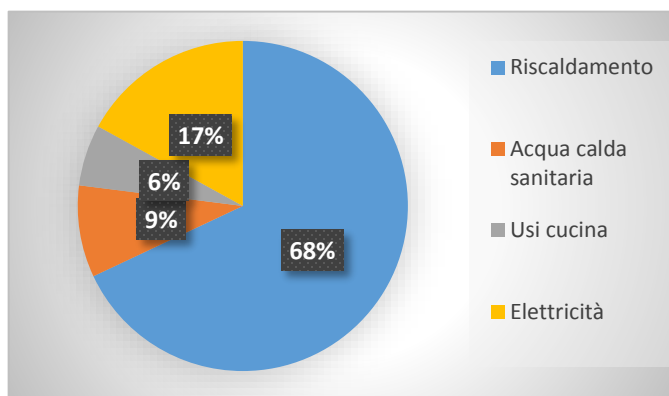


Fig. 3.2: Consumi energetici nel settore residenziale [30]

Il maggior contributo ai consumi energetici è dato dal settore civile (residenziale, commerciale, pubblica amministrazione) per il quale spetta una quota pari al 36 % maggiore rispetto alla quota dei trasporti (32 %) e dell'industria (23 %).

L'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) imputa tale contributo alla crescente diffusione degli impianti di riscaldamento e di raffrescamento, ed all'utilizzo di elettrodomestici e di impianti ed apparecchiature elettriche ed elettroniche [31].

La ripartizione della richiesta energetica in ambito residenziale [30] mostra che (Fig. 3.2):

- il riscaldamento copre oltre due terzi del consumo globale, risultando nel 2010 pari al 68 % del totale (andamento stabile nel tempo, pari al 69 % nel 1990);
- la richiesta di energia elettrica è aumentata dal 13 al 17 %;
- il consumo relativo alla produzione di acqua calda sanitaria è diminuito dall'11 al 9 %;
- la richiesta energetica per gli usi in cucina si è ridotto dal 7 al 6 %.

L'evoluzione del consumo energetico per abitazione è riportata in Fig. 3.3. Si può notare che in Italia c'è stato un decremento della richiesta, rispetto ai livelli del 2000, dell'8.3 %, valore non in linea con la media europea UE-27 (-15.5 %).

Da ciò si evince che nel residenziale occorre adottare una politica di risparmio energetico ancora più efficace in modo da intervenire sulle caratteristiche dell'involucro edilizio e sull'efficienza degli impianti, in modo tale da ottenere, nel breve periodo, effetti significativi. In

tal caso, si rende necessario trovare metodologie e tecniche costruttive idonee a ciascun contesto territoriale.

Nel settore terziario (servizi, commercio, pubblica amministrazione) la domanda di energia è in continua crescita. Si pensi che da un valore pari a circa 9.5 Mtep del 1995 si è giunti nel 2010 ad un valore pari a circa il doppio (20 Mtep). In questo settore la distribuzione delle fonti energetiche è molto differente dal caso residenziale, in quanto, in tale settore, sono utilizzati quasi esclusivamente il gas naturale (50.4 %) e l'energia elettrica (45.4 %) (Fig. 3.4).

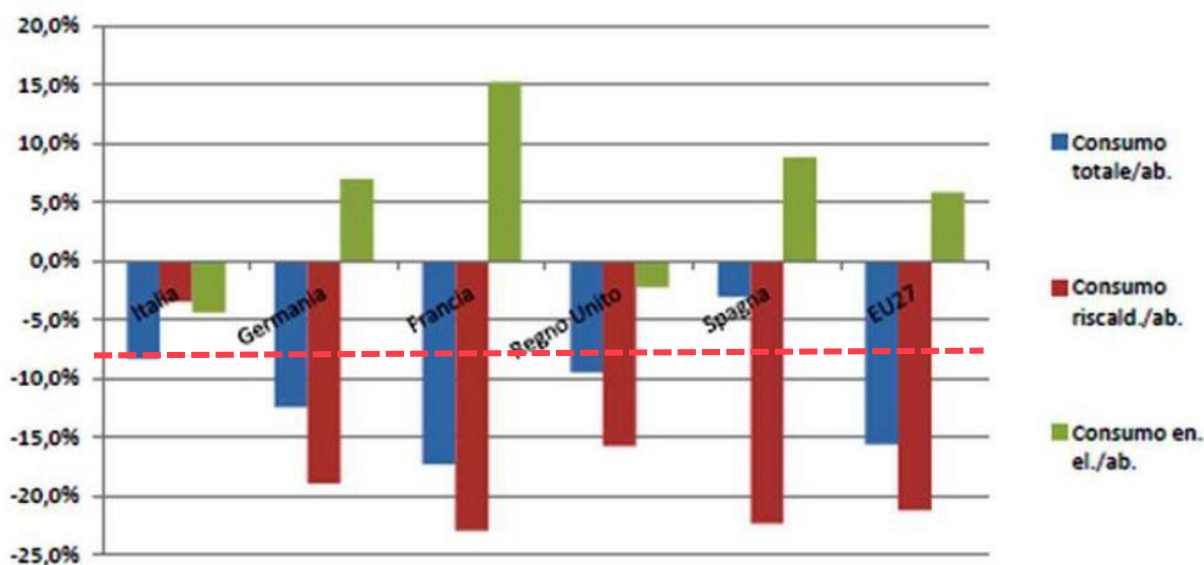


Fig. 3.3: Variazione del consumo energetico per riscaldamento, elettricità e totale (2000-2010). *Elaborazione ENEA su dati ODYSSEE [30]*

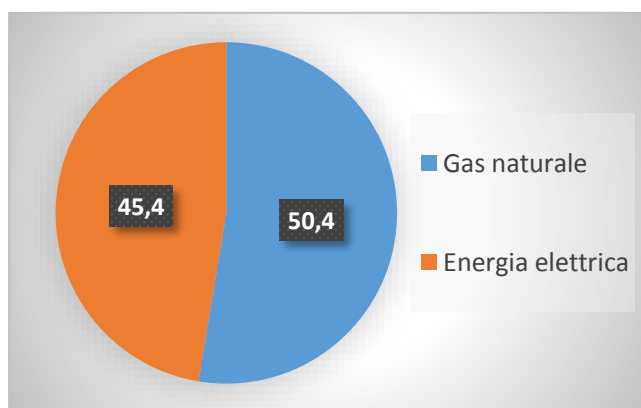


Fig. 3.4: Domanda energetica per fonte nel settore terziario [30]

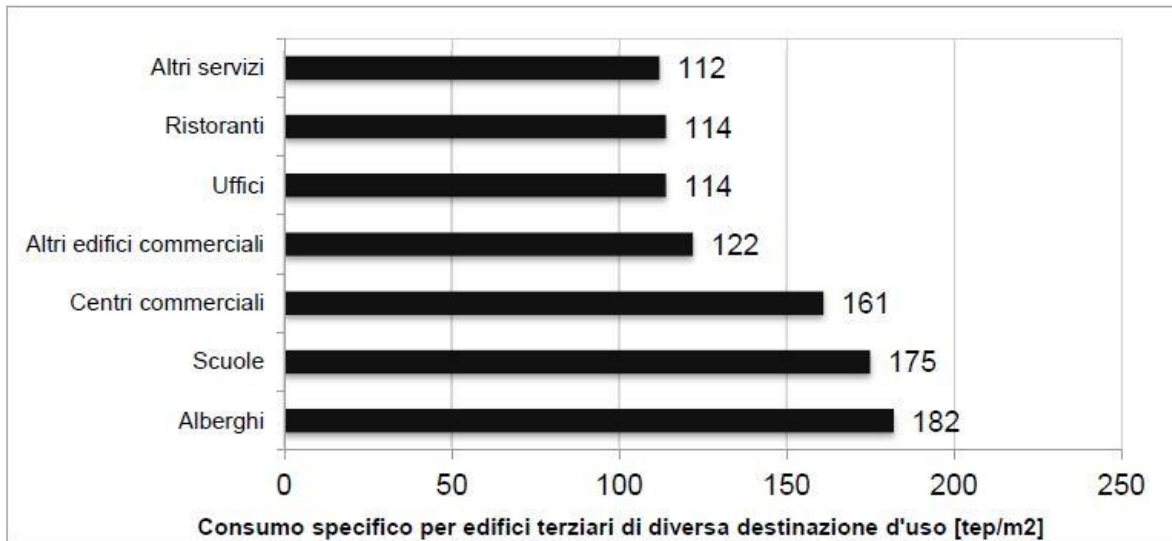


Fig. 3.5: Domanda energetica per fonte nel settore terziario [30]

Vari studi condotti dall'ENEA e dal Centro Ricerche Economiche Sociali di Mercato per l'Edilizia e il Territorio (CRESME) hanno stimato i consumi di diversi edifici del settore terziario, Fig 3.5. Tali lavori hanno mostrato i risparmi energetici significativi conseguibili con interventi di efficienza energetica programmati in corrispondenza delle attività di manutenzione straordinaria. In tale settore, risulta molto importante la Direttiva 2012/27/EU sull'efficienza energetica [17], che ha l'obiettivo di promuovere le attività di efficienza energetica negli edifici della pubblica amministrazione.

L'indice ODEX (Fig. 3.6), indice alternativo all'intensità energetica usato nel progetto ODYSSEE, consente di sintetizzare i risultati ottenuti sino ad oggi. Tale indice, nel 2010, aveva un valore pari ad 87. All'ottenimento di questo valore, hanno contribuito diversi settori:

- 3 settore residenziale: che è stato soggetto a miglioramenti maggiori e costanti nel tempo con un valore globale pari a circa 71 (incremento del 28.6 % rispetto al 1990);
- 4 settore industriale: ha avuto miglioramenti soltanto negli ultimi 5-6 anni;
- 5 settore trasporti: si è caratterizzato per un andamento dell'indice molto altalenante e per un incremento di efficienza molto più modesto.

Da quanto detto in precedenza, il settore edilizio rappresenta il punto chiave per ottenere elevati risparmi di risorse e per conseguire gli obiettivi al 2020 ed al 2030, in quanto contribuisce alla riduzione della domanda energetica, alla riduzione dell'impatto ambientale, nonché al miglioramento della sicurezza ed alla realizzazione dell'indipendenza di approvvigionamento.

Questo viene evidenziato nel Piano d'Azione Efficienza Energetica (PAEE, 2011) [32]. In tale documento è possibile notare che il maggior risparmio energetico (circa 2/3) è conseguibile, intervenendo sul settore residenziale e terziario (Fig. 3.7).

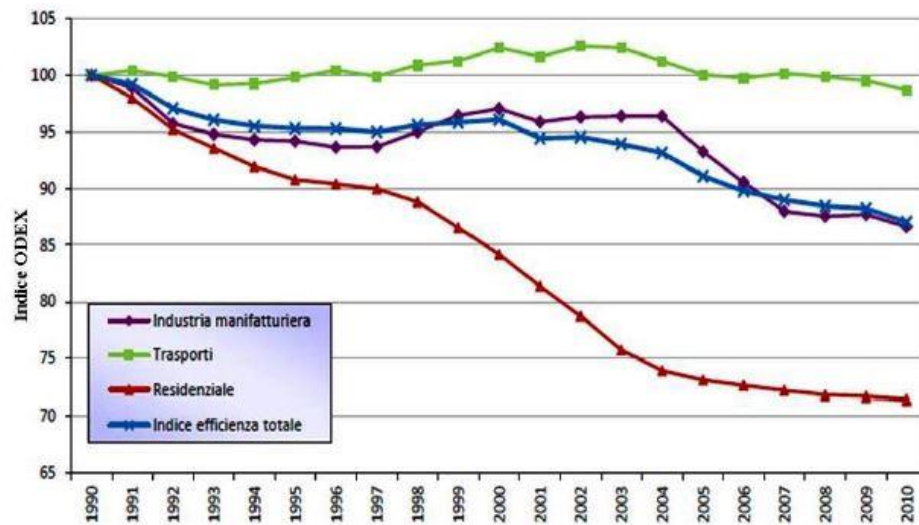


Fig. 3.6: Indice di efficienza energetica ODEX [30]

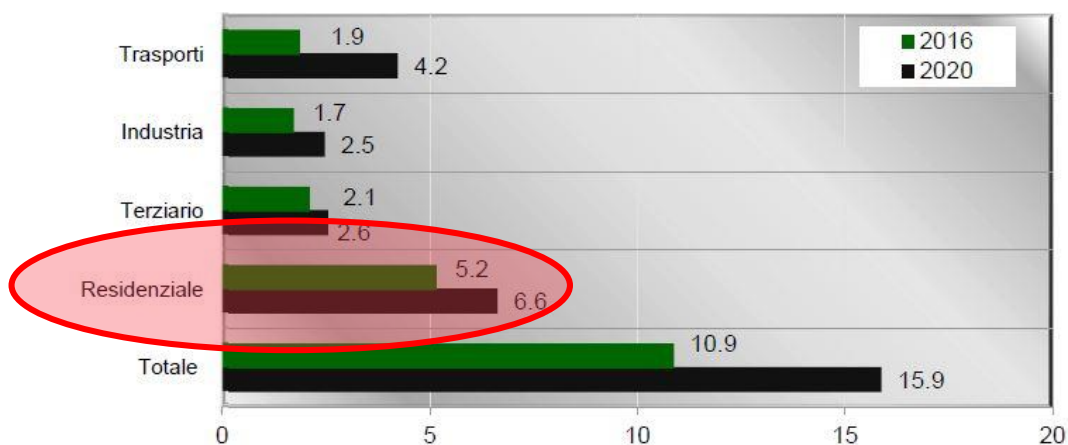


Fig. 3.7: Riduzione dei consumi finali attesi (2016, 2020) [32]

3.1 Una priorità per lo sviluppo sostenibile: l'efficienza energetica in edilizia

La Strategia Energetica Nazionale (SEN) (Fig. 3.1.1), varata con il decreto interministeriale dell'8 marzo 2013 [33], individua alcuni obiettivi principali:

1. riduzione dei costi energetici per i cittadini e per le imprese con un progressivo allineamento dei prezzi con i livelli europei. In particolare, è stato stimato un risparmio di circa 9 miliardi di euro ogni anno sulla bolletta nazionale di elettricità e gas;
2. superamento di tutti gli obiettivi ambientali europei al 2020. Questi includono la riduzione delle emissioni di gas serra del 21 % rispetto al 2005 (obiettivo europeo pari al 18 %), riduzione del 24 % dei consumi di energia primaria rispetto all'andamento inerziale (obiettivo europeo pari al 20 %) ed il raggiungimento del 19-20 % di incidenza dell'energia

rinnovabile sui consumi finali lordi (obiettivo europeo pari al 17 %). In particolare, ci si attende che le rinnovabili diventino la prima fonte nel settore elettrico al pari del gas con un'incidenza del 35-38 %;

3. minore dipendenza di approvvigionamento e maggiore flessibilità del sistema. L'84 % del fabbisogno energetico italiano è attualmente coperto da importazioni (la produzione nazionale da rinnovabili, gas e greggio coprono rispettivamente solo il 10 %, il 4 % e il 3 %). Si punta ad una riduzione della fattura energetica estera di circa 14 miliardi di euro l'anno (rispetto ai 62 miliardi attuali), con la diminuzione dall'84 al 67 % della dipendenza dall'estero;
4. impatto positivo sulla crescita economica grazie ai circa 170-180 miliardi di euro di investimenti previsti fino al 2020, sia nella green e white economy (rinnovabili ed efficienza energetica), che nei settori tradizionali (reti elettriche e gas, stoccaggi, sviluppo idrocarburi, ecc.) [34].

Per il raggiungimento di questi risultati la strategia si articola in sette priorità d'azione:

1. efficienza energetica;
2. mercato competitivo del gas;
3. sviluppo sostenibile delle energie rinnovabili;
4. sviluppo delle infrastrutture e del mercato elettrico;
5. ristrutturazione della raffinazione e della rete di distribuzione dei carburanti;
6. produzione sostenibile di idrocarburi nazionali;
7. modernizzazione del sistema di governance.

Tale Strategia Nazionale ha il fine di contribuire in modo significativo sul progresso degli standard ambientali, in modo tale da raggiungere e superare tutti gli impegni entro il 2020 ed un avvicinamento agli obiettivi della Roadmap 2050 [20].

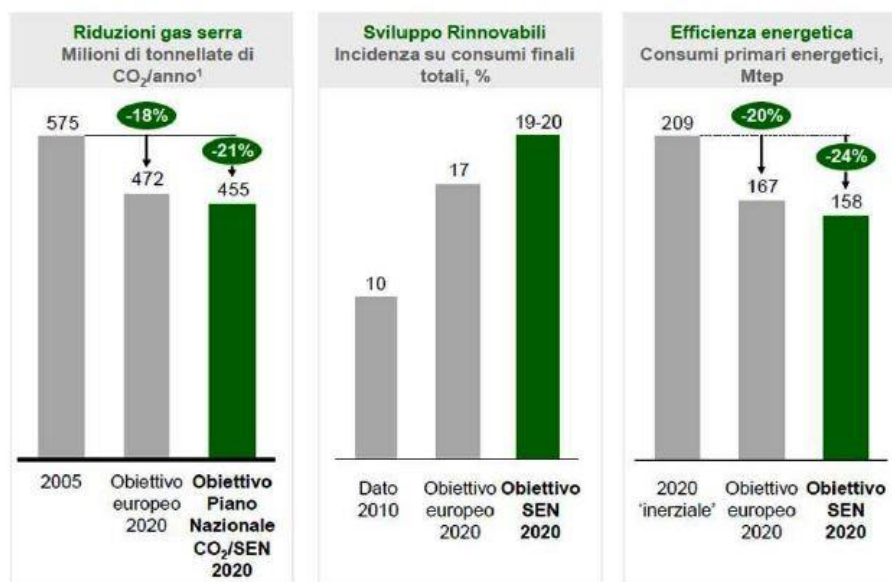


Fig. 3.1.1: Riduzione dei consumi finali attesi (2016, 2020) [33]

3.2 Dall'espansione al recupero, dalla quantità alla qualità. Risultati e potenzialità della riqualificazione edilizia

La crisi che ha colpito il mercato delle costruzioni, inevitabilmente, fa focalizzare l'attenzione sulla riduzione degli investimenti nel settore edile, Tab. 3.2.1 Tra il 2006 ed il 2013, il valore degli investimenti nelle costruzioni si è ridotto, considerando i valori costanti del 32 %; mentre, gli investimenti in nuova edilizia residenziale sono crollati del 58.7 %. Tutto questo ha condotto ad una riduzione pari al 60 % del giro di affari del mercato immobiliare (a causa del crollo del numero delle compravendite e dei prezzi) [35].

Tali dinamiche non devono far distogliere lo sguardo da dati molto interessanti, ossia la riqualificazione del patrimonio edilizio, che consente di porre un valore aggiunto al patrimonio edilizio esistente e di raggiungere livelli qualitativi superiori.

PERCENTUALE DELL'ATTIVITÀ DI RECUPERO SUL VALORE DELLA PRODUZIONE DELLE COSTRUZIONI 2006-2013*						
VALORI CORRENTI (MILIONI DI EURO)						
	2006			2013		
	% su val corr.	Valori correnti	Valori costanti 2005	% su val corr.	Valore assoluto	Valori costanti 2005
Investimenti Costruzioni(1)	83,2	160.038	154.731	74,8	129.846	105.421
Recupero	55,4	106.598	103.063	66,4	115.110	93.532
- Manutenzione ordinaria	16,5	31.704	30.652	18,6	36.215	29.389
- Manutenzione straordinaria	38,9	74.894	72.411	40,9	78.895	64.143
- di cui Residenziale	20,1	38.696	39.291	22,9	45.003	36.893
Nuova costruzione	44,3	85.144	82.320	29,3	50.951	41.278
- di cui Residenziale	21,1	40.639	39.291	11,5	19.797	16.229
Valore produzione costruzioni (2)	99,7	191.742	185.383	95,7	166.061	134.810
Fonti energetiche rinnovabili (FER)	0,3	661	642	4,3	7.461	16.133
PRODUZIONE TOTALE (3)	100,0	192.403	186.025	100,0	173.522	150.943

Tab. 3.2.1: La percentuale del recupero edilizio sul valore globale del settore delle costruzioni [35]

* Previsioni, (1) Investimenti Costruzioni = Nuove costruzioni + Manutenzione ordinaria, (2) Valore della produzione delle costruzioni = Investimenti + manutenzione ordinaria, (3) Produzione totale: Valore della produzione delle costruzioni+ FER

Nell'arco degli ultimi 10 anni, possiamo notare che il 58.6 % delle abitazioni ha subito almeno un intervento di manutenzione straordinaria o di ammodernamento, impiantistico o edilizio (Tab. 3.2.2), ovvero circa 17.6 milioni di abitazioni interessate, su un patrimonio di poco oltre 30 milioni di unità [36].

Molteplici fattori hanno spinto alla riqualificazione immobiliare:

1. vetustà del patrimonio edilizio;
2. interventi sulle abitazioni appena acquistate (perché il volume di compravendita è stato molto alto);
3. adeguamento alle nuove normative europee;
4. il ciclo di vita impiantistico breve;
5. le politiche incentivanti.

	2001		2011	
	migliaia	%	migliaia	%
Abitazioni esistenti	27.269	100,0	30.038	100,0
Interessate da riqualificazione nei precedenti 10 anni	11.871	43,5	17.613	58,6
- Impiantistica	9.729	35,7	12.524	41,7
- Strutture	1.833	6,7	2.756	9,2
- Estetica	7.825	28,7	9.214	30,7

Tab. 3.2.2: Lo stock edilizio e le relative attività di riqualificazione [37]

Dal censimento ISTAT 2011 [38], risulta che gli edifici residenziali, tra il 2001 ed il 2011, sono aumentati del 4.3 %, raggiungendo un numero pari a 11'714'262; mentre, le abitazioni sono invece pari a 28'863'604, il 5.8 % in più rispetto al 2001. Pertanto, come detto in precedenza, i comparti del recupero e della manutenzione mostrano, nel periodo di “crisi del settore edile”, una sostanziale tenuta e lieve crescita.

La qualità energetica di un organismo edilizio dipende dall'epoca di costruzione e dal suo stato di conservazione; infatti, il 30.1 % del patrimonio è stato costruito prima della seconda guerra mondiale, mentre, dal dopoguerra agli anni '90 il settore delle costruzioni si è espanso enormemente (70 % edifici, 78 % abitazioni). Soltanto nell'ultimo ciclo (a partire dal 2001) è presente un rallentamento (Fig. 3.2.3).

ABITAZIONI				EDIFICI				NUMERO MEDIO DI ABITAZIONI PER EDIFICIO
STOCK	30.038.200	100%		STOCK	11.740.083	100%		
di cui:				di cui:				
► Prima del 1919	3.893.567	13,0%		► Prima del 1919	2.150.259	18,3%		1,8
► 1919 - 1945	2.704.969	9,0%		► 1919 - 1945	1.383.815	11,8%		2,0
► 1946 - 1960	4.333.882	14,4%		► 1946 - 1960	1.659.829	14,1%		2,6
► 1961 - 1971	5.707.383	19,0%		► 1961 - 1971	1.967.957	16,8%		2,9
► 1972 - 1981	5.142.940	17,1%		► 1972 - 1981	1.983.206	16,9%		2,6
► 1982 - 1991	3.324.794	11,1%		► 1982 - 1991	1.290.502	11,0%		2,6
► 1992 - 2001	2.161.345	7,2%		► 1992 - 2001	771.927	6,6%		2,8
► Dopo il 2001	2.769.320	9,2%		► Dopo il 2001	532.588	4,5%		5,2

Fig. 3.2.3: Stock per epoca di costruzione [35]

Le tipologie costruttive sono molto differenti a seconda del periodo di riferimento:

- fino al 1920, è presente la muratura portante;
- tra il 1920 e il 1970 convivono la muratura portante e le strutture in cemento armato con tamponature esterne in doppio tavolato di laterizio forato;
- dopo il 1970 predominano le strutture in cemento armato;
- negli ultimi decenni domina sempre il calcestruzzo, anche se c'è un nuovo interesse per le strutture in muratura portante.

L'attuale inefficienza energetica dello stock edilizio italiano è frutto di soluzioni tecniche che in quegli anni non erano mirate al risparmio energetico ed alla ricerca della qualità, ma anche del degrado nel tempo causato da una manutenzione assente, che ha incrementato la scarsa efficienza dei sistemi di involucro edilizio e degli impianti nel garantire il comfort termo-igrometrico degli spazi confinati.

Le condizioni di manutenzione del patrimonio edilizio, correlate alla vetustà degli edifici, indicano che il 20 % circa di esso presenta uno stato di conservazione mediocre, mentre il 2.2 % è conservato in modo pessimo. Si tratta, quindi, di circa 2.6 milioni di edifici con evidenti necessità di riqualificazione (Tab. 3.2.4).

	Ottimo		Buono		Mediocre		Pessimo		Totale	
	Num.	%	Num.	%	Num.	%	Num.	%	Num.	%
Prima del 1919	316.700	14,7	1.049.615	48,8	680.381	31,6	103.563	4,8	2.150.259	100,0
Dal 1919 al 1945	193.696	14,0	691.480	50,0	436.613	31,6	62.026	4,5	1.383.815	100,0
Dal 1946 al 1961	279.450	16,8	913.295	55,0	425.106	25,6	41.978	2,5	1.659.829	100,0
Dal 1962 al 1971	444.051	22,6	1.142.554	58,1	357.587	18,2	23.765	1,2	1.967.957	100,0
Dal 1972 al 1981	619.516	31,2	1.114.754	56,2	237.164	12,0	11.772	0,6	1.983.206	100,0
Dal 1982 al 1991	450.912	34,9	709.981	55,0	123.812	9,6	5.797	0,4	1.290.502	100,0
Dal 1992 al 2001	367.438	47,6	346.595	44,9	54.807	7,1	3.087	0,4	771.927	100,0
Dopo il 2001	382.931	71,9	133.147	25,0	15.445	2,9	1.065	0,2	532.588	100,0
Totale	3.054.694	25,9	6.101.421	52,0	2.330.915	19,9	253.053	2,2	11.740.083	100,0

Tab 3.2.4: Stato conservazione [35]

Da ciò si evince che gli interventi sull'involucro edilizio sono i principali per abbattere i carichi termici di riscaldamento e di raffrescamento degli edifici ma, molto spesso, sono invasivi e non compatibili con la presenza contemporanea dell'utenza. Per tale motivo, soprattutto quando si interviene su edifici storici, quasi sempre vincolati per il loro valore storico-artistico, si cerca di adottare una diversa gestione del sistema edificio-impianto con tecnologie impiantistiche con un'efficienza energetica maggiore rispetto a quelle tradizionali, in modo tale da ridurre la richiesta di energia primaria e di potenza installata. Secondo dati CRESME, il rinnovamento del parco immobiliare in UE avviene con le seguenti percentuali:

- demolizioni: 0.2-0.5 %;
- costruzione nuovi edifici: 1-1.5 %;
- manutenzioni ordinarie e secondarie: 2 %;
- rinnovamento impianti tecnologici: 5 %.

In Italia, dove i dati sono in linea con quelli europei, occorre facilitare gli interventi di efficienza energetica per poter far crescere la quota relativa agli interventi sul patrimonio edilizio esistente.

Da dati CNA-CRESME [39], tra il 2006 ed il 2012 si è assistito ad un incremento degli interventi di recupero edilizio (Fig. 3.2.2) in funzione di quattro fattori concomitanti:

- crollo dell'edilizia di nuova costruzione (-44 % dal 2006 al 2012);
- ridimensionamento del rinnovo e della manutenzione straordinaria, soprattutto a causa della crisi dell'anno 2012 nei comparti del non residenziale e delle opere del genio civile;

- spinta motivazionale derivata dai provvedimenti di agevolazione fiscale (“36 %, 50 %, 55 %, 65 %”).

Il peso della spesa delle famiglie in interventi funzionali volti all’efficienza energetica, rispetto al complesso degli interventi di riqualificazione edilizia, è passato dal 25.8 % nel 2007 al 32.0 % nel 2011.

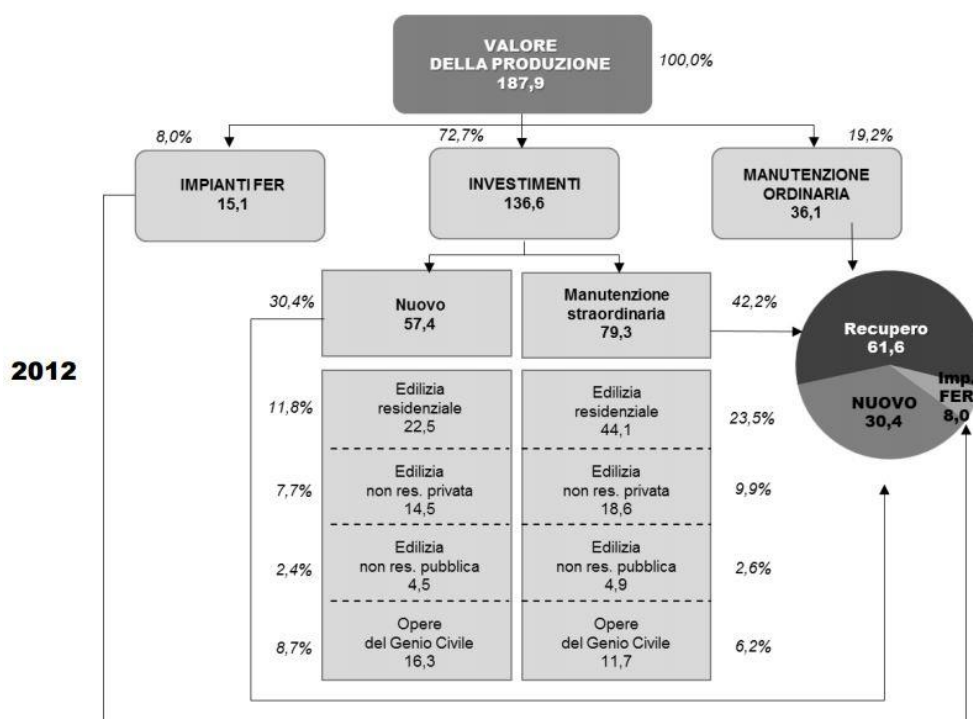


Fig. 3.2.2: Stato conservazione [35]

La Direttiva 2012/27/EU [17] ha imposto di stabilire, ai vari Stati membri, obiettivi nazionali indicativi di efficienza energetica, basati sul consumo di energia primaria o finale. Gli obiettivi, in Italia, sono stati definiti dalla Strategia Energetica Nazionale [33] e per il periodo 2011-2020 si inseriscono nella definizione di un percorso di decarbonizzazione al 2050 per l’Italia, coerente con la Roadmap delineata dalla Commissione Europea (-24 % di richiesta di energia e riduzione di 55 milioni di tonnellate di CO₂ ogni anno).

L’Italia adempie all’art. 7 della Direttiva “Efficienza Energetica” grazie al regime obbligatorio dei Certificati Bianchi (risparmio atteso di circa 5.5 Mtep/anno in termini di energia finale) e del Conto Termico (1.47 Mtep/anno a partire dal 2014). Gli obiettivi di risparmio sono riportati in Fig. 3.2.3 [40].

Le detrazioni fiscali hanno giocato un ruolo fondamentale nello sviluppo dell’efficienza energetica nel settore residenziale. In circa 8 anni (2007-2014) sono state trasmesse più di due milioni di richieste di detrazione fiscale all’ENEA. Nel 2013 si è presentato un notevole incremento delle richieste (circa 356’000 richieste), attribuibile certamente all’innalzamento al 65 % dell’aliquota di detrazione per le spese per gli interventi sul patrimonio edilizio, ma anche al limitato periodo di proroga di soli sei mesi di tali detrazioni. Queste condizioni hanno certamente stimolato gli utenti ad anticipare all’anno 2013 la realizzazione di quegli interventi di riqualificazione energetica che avrebbero comunque effettuato successivamente. In

particolare, la sostituzione degli infissi ha rappresentato più dei due terzi del totale degli interventi (Tabella 3.2.5) [40].



Fig. 3.2.3: Obiettivi di risparmio [28]

Tipologia di intervento	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Totale
Riqualificazione globale	3.180	5.700	5.600	1.917	1.450	3.579	3.566	24.992
Coibentazioni superfici opache e sostituzione infissi	39.220	112.600	127.800	226.720	170.400	135.283	244.421	1.056.444
Sostituzione calda acqua elettrici	20.140	37.100	35.300	47.106	29.350	33.801	26.851	229.648
Impianti di riscaldamento efficienti	27.560	57.700	68.000	129.883	79.500	72.571	81.123	516.337
Selezione multipla	15.900	34.700	-	-	-	-	-	50.600
Totale	106.000	247.800	236.700	405.626	280.700	245.234	355.961	1.522.060

Tab. 3.2.5: Richieste di detrazione per tipologia di intervento [40]

3.2.1 Il Rapporto CRESME 2014. Determinazione del mercato potenziale della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente

Il settore edilizio (residenziale, uffici e commerciale), in Italia, è il più energivoro (Fig. 3.2.1.1a-b); infatti, da dati provenienti dal Ministero dello Sviluppo Economico (MISE), relativi all'anno 2013, al settore edilizio sono associati circa 47 milioni di tonnellate di petrolio equivalenti (con una leggera riduzione dello 0.7 % rispetto al 2012).

Svolgendo un'analisi sul medio-lungo periodo, si può notare un trend di crescita costante delle richieste energetiche (Fig. 3.2.1.2).

In dettaglio, il settore residenziale presenta rilevanti oscillazioni della domanda energetica a causa dei fenomeni climatici, mentre i consumi del settore terziario appaiono più regolari nella loro crescita (Fig. 3.2.1.3).

Nel terziario i comparti che presentano una maggior richiesta energetica sono: gli alberghi (181 kWh/m²anno) ed i centri commerciali (161 kWh/m²anno) come si può notare in Fig. 3.2.1.4.

Il patrimonio edilizio italiano è un "colabrodo" energetico. Attualmente, le azioni edilizie sono molto differenti dagli anni precedenti; infatti, si punta più sugli impianti e sulla tecnologia.

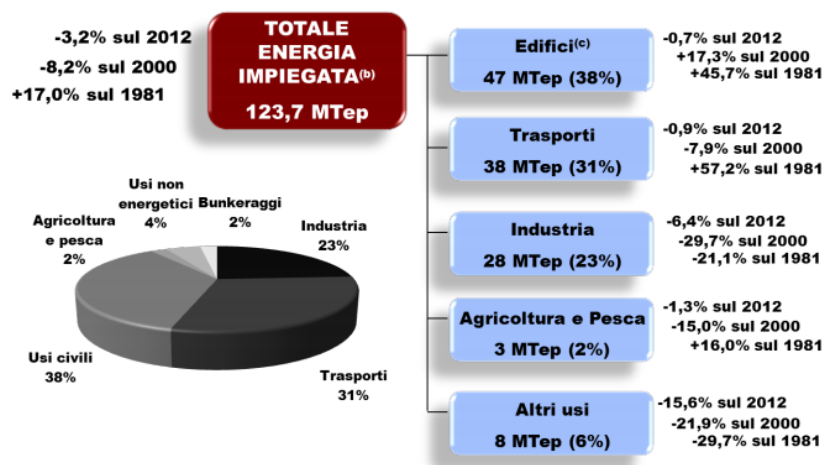


Fig. 3.2.1.1a: Bilancio energetico italiano. Elaborazione CRESME su dati MISE 2013 [35]

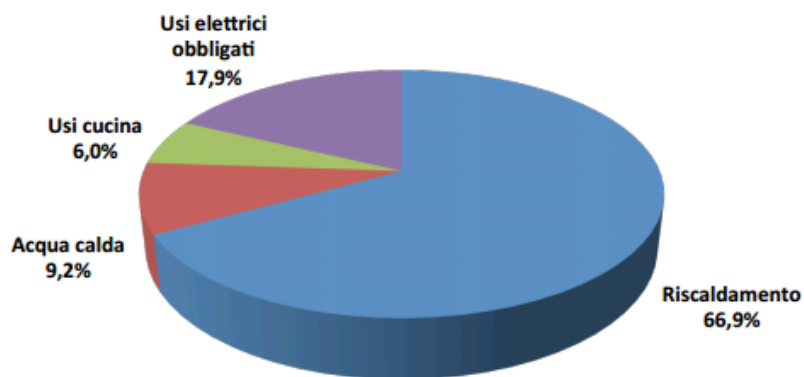


Fig. 3.2.1.1b: Consumi residenziali per tipo di utilizzo. Elaborazione CRESME su dati del MISE ed ENEA [35]

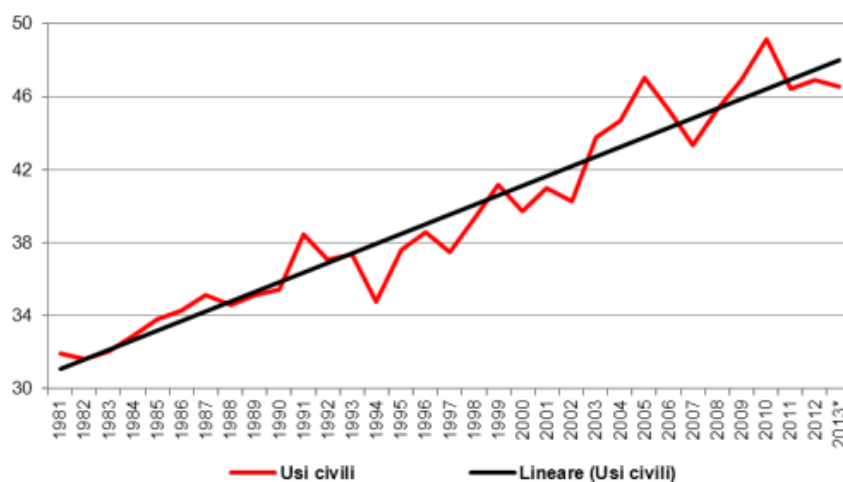


Fig. 3.2.1.2: Trend di crescita del consumo energetico (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio). Elaborazione CRESME su dati MISE ed ENEA [35]

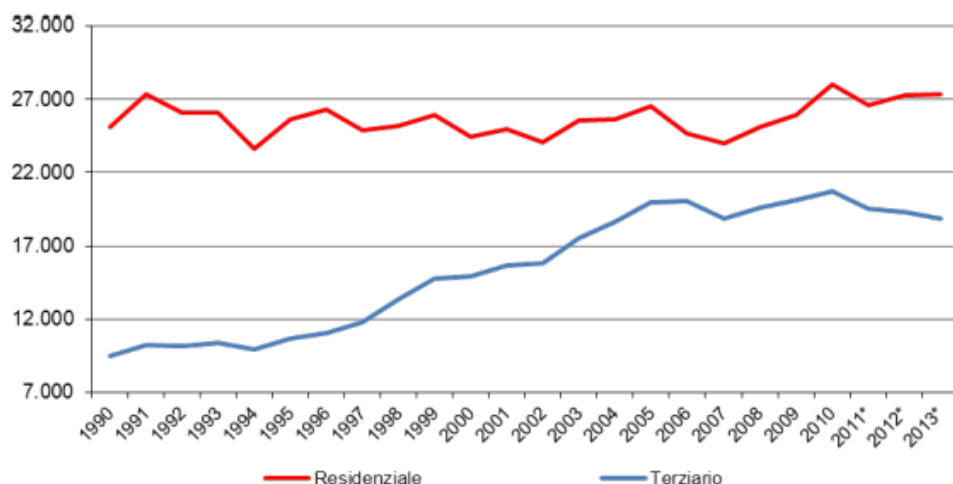


Fig. 3.2.1.3: Consumo energetico del settore residenziale e terziario (kTep/anno). Elaborazione CRESME su dati MISE ed ENEA [35]

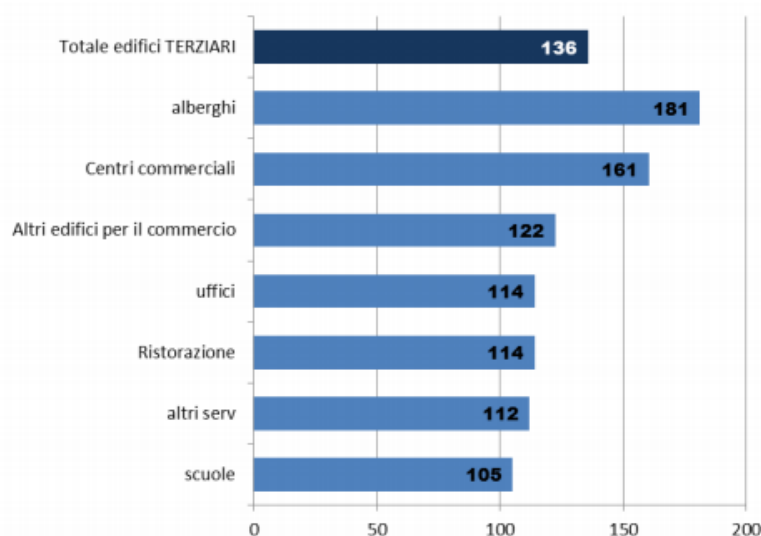


Fig. 3.2.1.4: Consumo energetico del settore terziario (kWh/m2/anno). Elaborazione CRESME su dati ENEA, CRESME ed Istat [35]

Per riuscire a puntare sulla riqualificazione del patrimonio edilizio esistente è necessario incoraggiare la domanda attraverso meccanismi incentivanti; occorre definire un quadro delle priorità e serve una visione strategica che derivi da un'analisi puntuale del vero fabbisogno di riqualificazione. Ciò che incide sulle diverse scelte, come visto precedentemente, sono:

- la “vetustà” del patrimonio edilizio e l’obsolescenza delle sue componenti;
- gli interventi riconducibili alla “personalizzazione” delle abitazioni acquistate;
- l’adeguamento alle normative europee in alcuni settori (impianti elettrici, di riscaldamento, ecc.) e l’evoluzione della domanda di ottimizzazione dell’efficienza energetica;
- la crescita della componente impiantistica negli edifici;
- le misure fiscali incentivanti.

I consumi energetici degli edifici ad uso terziario possono essere contenuti in misura non trascurabile con operazioni di miglioramento dell'efficienza energetica attuabili in corrispondenza di interventi di manutenzione straordinaria già programmati.

Di seguito, sono riportati dati relativi al patrimonio edilizio e delle sue potenzialità di riqualificazione in termini energetici, considerando i diversi componenti dell'involucro edilizio:

1. pareti;
2. coperture;
3. solai.

Tali componenti presentano enormi superfici, che implicano:

1. grandi sprechi energetici, avendo scarse prestazioni termo-energetiche;
2. grandi risorse per svolgere azioni di riqualificazione
3. ma, senza alcun dubbio, rappresentano un'imperdibile occasione di potenziamento delle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio e, di conseguenza, anche un'opportunità per il miglioramento del comfort ambientale negli spazi confinati e di riduzione delle emissioni nocive in atmosfera.

L'occasione è ancor più appetibile se si considera la capacità di generare occupazione diretta nell'edilizia.

Lo stock edilizio presenta una superficie complessiva dei componenti opachi pari a circa 10 miliardi di m². La costruzione di nuovi edifici induce ad un aumento progressivo di queste superfici, che ciclicamente sono sottoposte ad interventi di ristrutturazione. Ogni anno, dunque, si effettuano lavori sia di nuova costruzione che di ristrutturazione dei vari componenti edilizi (sui quali deve o dovrebbe essere prevista l'applicazione o la sostituzione di materiali isolanti).

Considerando l'arco temporale 2014-2023, si può notare che il potenziale medio annuo ammonta a circa 155 milioni di m², composto da:

- 59 milioni di m² di superficie (nuova costruzione);
- 97 milioni di m² di superficie (manutenzione straordinaria).

L'edilizia residenziale contribuisce per il 74.8 % al potenziale annuo con 116 milioni di m² (39.9 milioni m² dalla nuova costruzione e 76.5 milioni m² da interventi di ristrutturazione); mentre, il non residenziale civile contribuisce con oltre 39 milioni di m² (18.9 milioni di m² di nuova costruzione e 20.2 milioni m² di interventi di ristrutturazione).

Successivamente, vedremo, in Tab. 3.2.1.1 – 3.2.1.2, che il componente edilizio opaco che presenta una maggiore quantità di superfici e, quindi, un maggior potenziale di risparmio energetico è il tetto (Fig. 3.2.1.5).

In dettaglio, nei punti successivi, si riportano in misura decrescente gli ambiti potenziali della riqualificazione energetica:

1. coperture con 81.3 milioni di m² medi annui di interventi (12.2 milioni m² di nuova costruzione e 69.1 milioni m² di interventi di manutenzione);
2. pareti perimetrali con 47.5 milioni m² medi annui (25.8 milioni di nuova costruzione e 21.7 milioni di ristrutturazione);
3. solai a piano terra e dei sottotetti che presentano un potenziale più contenuto con 26.6 milioni di m² medi annui (20.7 milioni m² di nuova costruzione e 5.9 milioni m² di interventi di manutenzione).

Il potenziale della ristrutturazione edilizia opera, sottraendo consumi ad un patrimonio edilizio esistente energeticamente inefficiente. E' per questo motivo che è stato approfondito il risparmio

	Stock (mln mq)	Potenziale nuova costruzione 2014 – 2023 (mln mq)	Potenziale ristruttur. 2014 – 2023 (mln mq)	Potenziale TOTALE 2014- 2023	Potenziale nuova costruzione ANNUO 2014 - 2023	Potenziale ristruttur. ANNUO 2014 - 2023	Potenziale TOTALE ANNUO 2014 - 2023
Pareti perimetrali residenziale	4.140	168,1	149,5	317,6	16,8	15,0	31,8
Pareti perimetrali non residenziale	909	89,5	67,0	156,5	9,0	6,7	15,7
Coperture residenziale	1.478	82,4	563,0	645,4	8,2	56,3	64,5
Coperture non residenziale	694	39,6	128,0	167,6	4,0	12,8	16,8
Solai e sottotetti residenziale	1.918	148,3	52,0	200,3	14,8	5,2	20,0
Primo solaio non residenziale	693	59,4	7,0	66,4	5,9	0,7	6,6
RESIDENZIALE	7.536	398,8	764,5	1.163,3	39,9	76,5	116,3
NON RESIDENZIALE	2.296	188,5	202,0	390,5	18,9	20,2	39,1
TOTALE	9.832	587,3	966,5	1.553,8	58,7	96,7	155,4

Tab. 3.2.1.1: Stock edilizio e potenzialità degli interventi di ristrutturazione 2014-2023 [35]

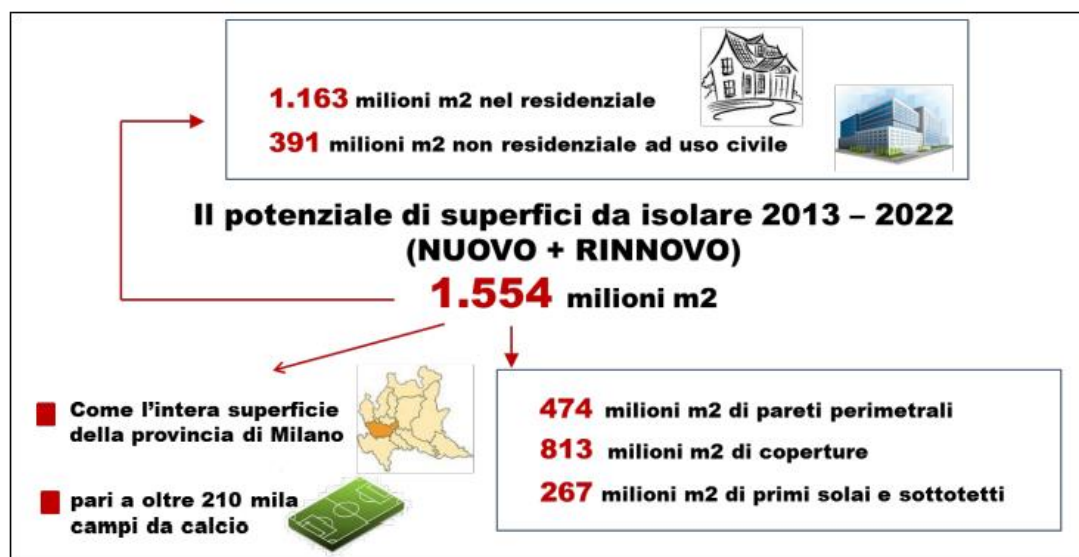


Fig. 3.2.1.5: Superfici complessive e suddivise per componente edilizio. Potenzialità degli interventi 2014-2023 [41]

energetico, la riduzione dell'impatto ambientale ed i benefici economici ottenibili, operando azioni principalmente su alcuni reference buildings provenienti dallo stock edilizio.

Tenendo presente il potenziale annuo di interventi (residenziale + non residenziale) pari a 96.7 milioni di m², si prevede un investimento pari a 11.7 miliardi di euro annui, comportando:

- risparmio conseguibile di 4.500 GWh termici annui (535 milioni di euro per ogni anno);
- riduzione delle emissioni di circa 890 mila tonnellate di gas climalteranti.

L'adozione di misure incentivanti pari al 65 % induce ad un recupero dell'investimento in 7.6 anni (valore ottenuto rapportando semplicemente l'importo investito annualmente, detraendo le somme rimborsate fiscalmente al risparmio annuo). Dal lavoro si intuisce che gli incentivi fiscali rappresentano un potente acceleratore del tempo di recupero dell'investimento poiché in assenza di essi si otterrebbe un ammortamento dell'investimento in 21.8 anni.

	Stock (mln mq)	Potenziale 2014-2023 (mln mq annui)	Investimento (mln € annui)	Risparmio potenziale (GWh annui)	Risparmio potenziale (mln € annui)	CO2 non emessa (Kt annue)	Pay back time con incentivi (anni con 65% per riqual. energetica)
Pareti perimetrali residenziale	4.140	15,0	1.121,3	462,1	55,5	92,43	7,1
Pareti perimetrali non residenziale	909	6,7	402,0	176,0	21,1	35,21	6,7
Coperture residenziale	1.478	56,3	8.445,0	3.109,5	373,1	621,90	7,9
Coperture non residenziale	694	12,8	1.280,0	530,2	63,6	106,04	7,0
Solai e sottotetti residenziale	1.918	5,2	364,0	164,1	19,7	32,82	6,5
Primo solaio non residenziale	693	0,7	45,5	18,1	2,2	3,62	7,3
Residenziale	7.536	76,5	9.930,3	3.735,8	448,3	747,2	7,8
Non residenziale	2.296	20,2	1.727,5	724,4	86,9	144,9	7,0
Totale edifici Italia	9.832	96,7	11.657,8	4.460,1	535,2	892,0	7,6

Tab. 3.2.1.2: Potenziale di intervento, investimenti, risparmi e tempo di recupero degli investimenti 2014-2023.
Elaborazione CRESME su dati ENEA, Istat, prezziari e Cresme/SI [35]

Per capire le quantità in gioco, il Rapporto CRESME [41] evidenzia che tali dati possono essere così paragonati (Fig. 3.2.1.6):

- le superfici potenziali annue da sottoporre a ristrutturazione (96.6 milioni di m²) per estensione possono essere paragonate a 13'500 campi di calcio;
- il risparmio di 4500 GWh termici può essere inteso come il risparmio conseguibile da 390'000 caldaie autonome (considerando il consumo medio nazionale di circa 1400 m³ di metano annui);
- le emissioni annue evitate pari a 890 kt annue sono paragonabili all'assorbimento annuo garantito da circa 30 milioni di alberi adulti oppure paragonabili alle emissioni annue di 283 mila automobili euro 5 (126.2 g CO₂/km per 25 mila km all'anno).

Negli ultimi 15 anni, l'84 % dello stock edilizio non ha subito interventi di riqualificazione. Pertanto, è possibile individuare il mercato potenziale per ottenere il risparmio energetico, isolando termicamente l'involucro edilizio:

- superficie totale dei componenti opachi pari a 96.7 milioni di m², di cui:
 - 216 milioni di m² di pareti perimetrali (150 milioni per il residenziale – media annua 15.0 milioni m² e 67 milioni per il non residenziale – media annua 6.7 milioni m²);
 - 691 milioni di m² di coperture (563 milioni per il residenziale – media annua 56,3 milioni m² e 128 milioni per il non residenziale – media annua 12.8 milioni);
 - 59 milioni di m² di solai e sottotetti (52 milioni per il residenziale – media annua 5.2 milioni m² e 7 milioni per il non residenziale – media annua 0.7 milioni m²).

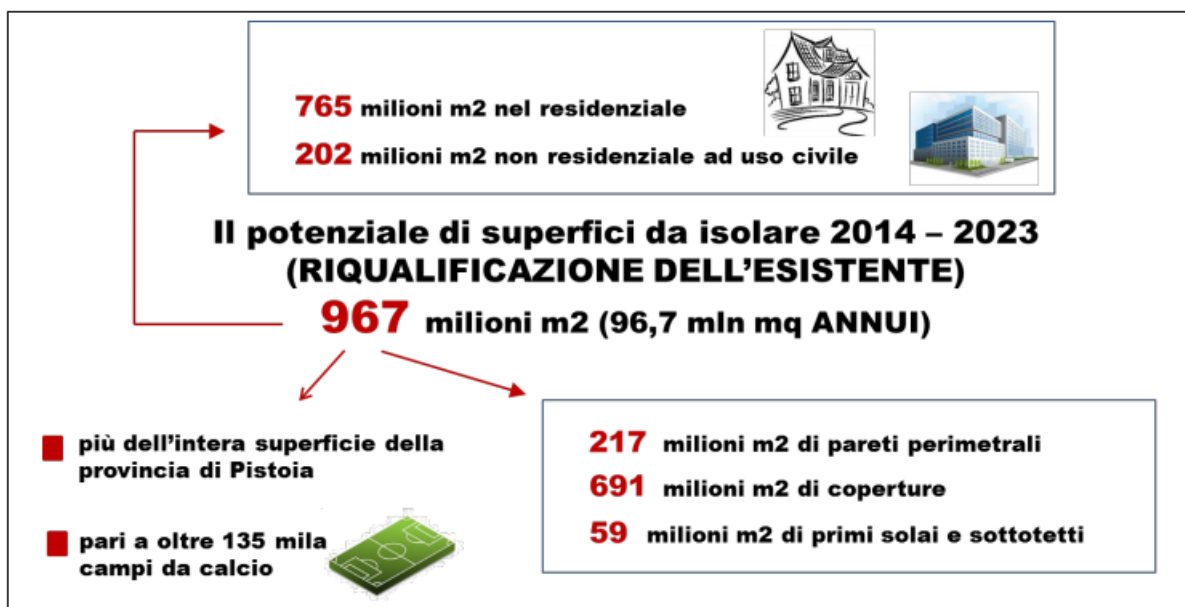


Fig. 3.2.1.6: Potenziale di superfici da sottoporre ad isolamento termico 2014-2023 [41]

È stato rilevato un tasso di intervento più elevato sulle coperture residenziali (3.8 %); invece, sulle pareti e sui solai residenziali si tende ad intervenire in maniera limitata (rispettivamente 0.4 % e 0.1 %).

Considerando il settore terziario, dalla Tab. 3.2.1.3 è possibile notare che il 35 % degli edifici ad uso ufficio presenta finestre con vetro singolo caratterizzate, quindi, da scarsissime prestazioni termiche; nelle scuole la quota è pari al 29 %; mentre negli alberghi, nelle banche e nei centri commerciali la percentuale scende tra il 13 ed il 19 %.

Le fonti energetiche rinnovabili sono più impiegate negli edifici ad uso albergo e banca; mentre, la quota più alta di edifici sprovvisti di impianti ad energia rinnovabile sono gli uffici. Pertanto, vi è un ampio spazio di intervento in questo ambito.

Un altro aspetto su cui porre l'attenzione è la quota di edifici in ristrutturazione. Dalla tabella si rileva che il tasso di rinnovo annuale varia tra l'1.3 % ed il 3.9 %. Da queste percentuali si giunge alla quota di edifici ristrutturati ogni anno, ossia 2'159 edifici (considerando le 5 categorie). Estendendo il ragionamento all'intero stock edilizio ed utilizzando un tasso pari a circa l'1.5 %, si ottiene che oltre 6'900 edifici l'anno sono oggetto di interventi di manutenzione.

Tutti i dati connessi al numero di edifici ed al quantitativo di superfici dei vari componenti edilizi sono riportati nelle Tab. 3.2.1.4 – 3.2.1.12.

	Quota di edifici con finestre a vetro singolo	Quota di edifici senza uso di energie rinnovabili	Quota di edifici in ristrutturazione parziale o totale	Quota di edifici non totalmente utilizzati
Uffici	35%	96%	1,3%	16%
Scuole	29%	89%	1,7%	13%
Alberghi	19%	85%	1,4%	9%
Banche	13%	85%	1,9%	13%
Centri commerciali	15%	87%	3,9%	-

Tab. 3.2.1.3: Parametri per la valutazione del potenziale di intervento [36]

	Mono-bi familiari	Tri – quadri familiari	Pluri familiari	Totale edifici
Nord	3.846.842	508.187	573.739	4.928.768
Centro	1.489.217	222.890	232.181	1.944.288
Sud	4.204.644	372.456	329.114	4.906.214
Italia	9.540.703	1.103.533	1.135.034	11.779.270

Tab. 3.2.1.4: Numero edifici [36]

	Mono-bi familiari	Tri – quadri familiari	Pluri familiari	Totale edifici
Nord	4.961.890	1.742.113	7.359.712	14.063.715
Centro	1.915.310	763.781	2.951.309	5.630.400
Sud	5.041.878	1.293.109	4.130.180	10.465.167
Italia	11.919.078	3.799.003	14.441.201	30.159.282

Tab. 3.2.1.5: Numero abitazioni [36]

	Mono-bi familiari	Tri – quadri familiari	Pluri familiari	Totale edifici
Nord	1.179,1	269,0	560,7	2.008,8
Centro	425,4	111,5	217,0	753,8
Sud	957,2	159,5	261,2	1.377,9
Italia	2.561,7	539,9	1.038,8	4.140,5

Tab. 3.2.1.6: Superficie lorda delle pareti esterne al netto degli infissi (Milioni di m²) [36]

	Mono-bi familiari	Tri – quadri familiari	Pluri familiari	Totale edifici
Nord	172,6	74,6	164,6	411,7
Centro	62,5	31,1	63,9	157,4
Sud	132,3	46,1	80,1	258,5
Italia	367,3	151,8	308,5	827,6

Tab. 3.2.1.7: Superficie dei divisori interni, comprese pareti esterne contigue (Milioni di m²) [36]

	Mono-bi familiari	Tri – quadri familiari	Pluri familiari	Totale edifici
Nord	76,9	48,4	100,9	226,2
Centro	27,6	20,1	39,1	86,7
Sud	45,7	28,7	47,0	121,4
Italia	150,1	97,2	187,0	434,3

Tab. 3.2.1.8: Superficie dei divisori interni (Milioni di m²) [36]

	Mono-bi familiari	Tri – quadri familiari	Pluri familiari	Totale edifici
Nord	580,0	159,3	504,5	1.243,8
Centro	223,5	69,9	203,6	497,0
Sud	546,4	108,5	269,6	924,5
Italia	1.349,9	337,7	977,7	2.665,3

Tab. 3.2.1.9: Superficie dei solai (Milioni di m²) [36]

	Mono-bi familiari	Tri – quadri familiari	Pluri familiari	Totale edifici
Nord	374,9	86,3	201,4	662,5
Centro	149,4	37,9	80,8	268,0
Sud	382,3	58,8	106,2	547,3
Italia	906,5	182,9	388,4	1.477,9

Tab. 3.2.1.10: Superficie delle coperture totali (Milioni di m²) [36]

	Mono-bi familiari	Tri – quadri familiari	Pluri familiari	Totale edifici
Nord	332,6	43,6	49,3	425,5
Centro	165,5	24,5	25,5	215,5
Sud	191,1	17,4	15,6	224,2
Italia	689,2	85,5	90,4	865,1

Tab. 3.2.1.11: Superficie delle coperture a falde (Milioni di m²) [36]

	Mono-bi familiari	Tri – quadri familiari	Pluri familiari	Totale edifici
Nord	42,3	42,7	152,1	237,1
Centro	5,5	9,0	38,0	52,5
Sud	169,6	45,7	107,9	323,2
Italia	217,4	97,4	298,0	612,8

Tab. 3.2.1.12: Superficie delle coperture piane praticabili e non praticabili (Milioni di m²) [36]

3.3 Strumenti finanziari

L'accordo tra UE ed Italia [42] definisce la strategia per un utilizzo ottimale dei fondi strutturali.

Nel periodo 2014-2020, saranno gestiti fondi europei pari a circa 44 miliardi di euro e la quota di cofinanziamento nazionale sarà pari a 20 miliardi di euro. Gli strumenti finanziari sono i seguenti:

- 1) Fondi di coesione: 32.2 miliardi di euro di finanziamenti totali, suddivisi in:
 - Fondo europeo di sviluppo regionale (FESR): 20.6 miliardi;
 - Fondo sociale europeo (FSE): 10.4 miliardi;

- Cooperazione territoriale europea: 1.1 miliardi.
- Youth Employment Initiative, per l'occupazione giovanile: 567 milioni di euro;
- 2) Fondo europeo agricolo per lo sviluppo rurale (FEASR): 10.4 miliardi di euro;
- 3) Fondo europeo per gli affari marittimi e la pesca (FEAMP): 537.3 milioni di euro.

I fondi FESR e FSE saranno distribuiti nel seguente modo:

- 22.2 miliardi di euro per le regioni meno sviluppate (Campania, Puglia, Basilicata, Calabria e Sicilia);
- 1.3 miliardi di euro per le regioni in transizione (Sardegna, Abruzzo e Molise);
- 7.6 miliardi di euro per le regioni più sviluppate.

Inoltre, vi sono i Programmi Operativi Nazionali o Regionali (PON o POR) che sono fondi gestiti a livello regionale, in grado di finanziare azioni e politiche correlate all'efficienza energetica ed all'ambiente.

Il nuovo Programma Horizon 2020 promuove l'innovazione tecnologica per conseguire il fine di riduzione delle emissioni nocive in atmosfera ed accelerare lo sviluppo delle low-carbon technologies. Allontanandosi di gran lunga dagli altri programmi europei, Horizon 2020 ha il fine di correlare Ricerca, Sviluppo ed Innovazione. Il Programma predispone un budget totale pari a 80 miliardi di euro per finanziare (contributi a fondo perduto) fino al 100 % le attività di ricerca e sviluppo tecnologico.

Il Programma presenta tre pilastri:

- 1) Excellence Science, riguardante la ricerca considerata come il fondamento per lo sviluppo tecnologico, le opportunità lavorative ed il benessere sociale del futuro;
- 2) Industrial Leadership, focalizzato sullo sviluppo di alcune tecnologie chiave quali Information Communication Technology (ICT), le nanotecnologie, ecc. che richiedono il supporto economico del privato nelle loro fasi di R&S, nonché di un numero crescente di PMI innovative in grado di creare lavoro e crescita.
- 3) Societal Challenges, che ritiene come pilastro fondamentale l'innovazione basata su un approccio multidisciplinare.

Il Programma per l'ambiente e per il clima: LIFE 2014-2020, introduce uno strumento finanziario innovativo basato sull'efficienza energetica. Il Private Finance for Energy Efficiency (PF4EE) fa parte del sottoprogramma Climate Action e la sua principale priorità è la tutela dell'ambiente e l'adattamento ai cambiamenti climatici in Europa. Le banche e le PMI sono tra i beneficiari di questo strumento che ha un budget totale di 30 milioni di euro.

Il fondo nazionale per l'efficienza energetica è uno strumento finanziario ad hoc rivolto alla Pubblica Amministrazione con lo scopo di favorire gli interventi di riqualificazione energetica. L'obiettivo sarà quello di finanziare interventi rivolti a migliorare l'efficienza energetica dell'intero edificio, promuovere nuovi edifici ad energia quasi zero, introdurre un aspetto importante della sicurezza antisismica, ecc.

3.4 L'efficienza energetica in edilizia: il quadro legislativo

Oggigiorno, ogni provvedimento in materia di efficienza e risparmio energetico non può non prescindere dalla consapevolezza che l'energia richiesta dal settore edilizio rappresenta circa il

40% del consumo globale della comunità europea, in linea con quanto evidenziato nelle premesse della direttiva europea 2002/91/EC, Energy Performance of Buildings, EPBD [14], oggi aggiornata dalla direttiva 2010/31/EU (EPBD recast) [16].

I principi e le indicazioni introdotte dalla EPBD “relativa al rendimento energetico nell'edilizia” sono stati recepiti, in Italia, dal D.Lgs. 192/05 [15], il quale, dopo 14 mesi dalla sua emanazione, è stato integrato e corretto dal D.Lgs. 311/06, recante “*Disposizioni correttive ed integrative al Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192*” [43].

Al testo integrato è stato affidato il compito di riorganizzare la normativa in materia di risparmio energetico degli edifici, ovvero, secondo l'art. 1, di stabilire: “...i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal Protocollo di Kyoto, promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico...”.

Con il fine di evitare un aggravamento della procedura di infrazione nei confronti dell'Italia, a causa del mancato recepimento della direttiva 2010/31/UE, è stato emanato, recentemente, l'ultimo atto ufficiale dell'iter legislativo italiano in materia di efficienza energetica del parco edilizio italiano, ossia il D.L. 63/ 2013 convertito nella L. 90/2013 recante: “*Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché' altre disposizioni in materia di coesione sociale*” [44]. Tali disposizioni determinano una sostanziale modifica della metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, dei requisiti minimi e degli ambiti di intervento, che vedremo nei paragrafi successivi.

3.4.1 L'evoluzione legislativa: dal limite prescrittivo a quello prestazionale – D. Lgs. 192/05, D. Lgs. 311/06, ecc.

Il D.Lgs. 192/05 [15] come modificato dal D.Lgs 311/06 [43] e s.i. prevedeva, in funzione del tipo di intervento edilizio o impiantistico, l'attuazione di diverse metodologie: un'applicazione integrale ed un'applicazione limitata delle disposizioni in materia di efficienza/risparmio energetico.

Il primo caso, applicazione integrale, aveva il fine di verificare diversi indicatori di prestazione:

- valutazione del fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione invernale (EPI) e verifica che lo stesso risultasse inferiore ai valori limite;
- calcolo del rendimento globale medio stagionale dell'impianto termico e verifica che lo stesso fosse superiore ad un certo valore limite.

Il secondo caso, applicazione limitata, aveva il fine di verificare il rispetto di specifici parametri:

- per interventi di ristrutturazioni totali o parziali, interventi di manutenzione straordinaria dell'involucro edilizio ed ampliamenti volumetrici per una cubatura complessiva di nuova costruzione inferiore al 20 % del volume preesistente, si prevedeva che i valori di trasmittanza termica (U), dei nuovi componenti opachi e trasparenti

dell'involucro edilizio, fossero inferiori a quelli limite introdotti dall'allegato C, tabelle 2,3 e 4.

Con le recenti disposizioni legislative e normative, si cerca di passare da un sistema basato sul limite prescrittivo, ad un sistema in cui le prestazioni energetiche edilizie sono confrontate con quelle di un edificio di riferimento (reference building o edificio target), come previsto dalla nuova metodologia del Cost-optimal.

La definizione del Reference Building (in funzione dell'intervento e della tipologia edilizia) costituisce, lo start-up per l'applicazione della nuova metodologia imposta dal Regolamento n. 244/2012 della Commissione Europea [45], che istituisce un quadro metodologico comparativo necessario per calcolare i livelli ottimali in funzione dei costi dei requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici sia nuovi che esistenti (ed anche per i singoli elementi edilizi).

Il quadro metodologico introdotto dal Regolamento di cui sopra, definisce le regole con cui comparare tutte le azioni di efficienza energetica (anche lo sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili) in funzione della richiesta energetica primaria e del costo assegnato alla loro attuazione. Più in dettaglio, sono specificate le procedure per la valutazione dei livelli ottimali in funzione dei costi, considerando una duplice prospettiva:

- prospettiva macroeconomica (che considera i costi ed i benefici degli investimenti in efficienza energetica per tutta la società);
- prospettiva finanziaria (che valuta soltanto l'intervento).

“È competenza degli Stati membri fissare requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi. Tali requisiti devono essere fissati al fine di raggiungere livelli ottimali in funzione dei costi. Spetta agli Stati membri decidere se il riferimento nazionale utilizzato quale risultato finale dei calcoli del costo ottimale debba essere calcolato sulla base di una prospettiva macroeconomica (che considera i costi e i benefici per tutta la società degli investimenti in efficienza energetica), oppure di una prospettiva prettamente finanziaria (che considera solamente l'investimento stesso). È opportuno che i requisiti minimi nazionali di prestazione energetica non siano inferiori di più del 15 % ai risultati dei calcoli di ottimalità dei costi adottati come riferimento nazionale. Il livello ottimale in funzione dei costi si situa all'interno della forchetta dei livelli di prestazione per i quali l'analisi costi-benefici sul ciclo di vita è positiva” [45].

La metodologia del Cost Optimal, introdotta nel Regolamento, si suddivide in sei fasi:

- 1) definizione degli edifici di riferimento (abitazioni monofamiliari, condomini, uffici);
- 2) identificazione delle misure di efficienza energetica (si considerano tutti i parametri che hanno un impatto diretto ed indiretto sulla prestazione energetica dell'edificio);
- 3) valutazione del fabbisogno di energia primaria (si utilizzano fattori di conversione definiti a livello nazionale, Tab.....);
- 4) calcolo del costo globale in termini di valore attuale netto per ogni edificio di riferimento (si considerano diverse categorie: costo iniziale, costi di gestione, costi energetici, costi di smaltimento, costo emissioni di gas serra);
- 5) analisi di sensibilità per i calcoli che includono i prezzi dell'energia;
- 6) derivazione del livello ottimale in funzione dei costi della prestazione energetica di ciascun edificio di riferimento.

3.4.2 La Legge 90/2015

Con il fine di evitare un aggravamento della procedura di infrazione nei confronti dell'Italia, a causa del mancato recepimento della direttiva 2010/31/UE, è stato emanato, recentemente, l'ultimo atto ufficiale dell'iter legislativo italiano in materia di efficienza energetica del parco edilizio italiano, ossia il D.L. 63/2013 convertito nella L. 90/2013 recante: *“Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché' altre disposizioni in materia di coesione sociale”* [44]. Tali disposizioni determinano una sostanziale modifica della metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, dei requisiti minimi e degli ambiti di intervento.

Da un sistema basato sul limite prescrittivo, si cerca di giungere ad un sistema prestazionale in cui le prestazioni energetiche degli edifici sono confrontate con quelle di un edificio “target”, ossia un fabbricato di riferimento, nel quale vi sono impianti tecnici anch'essi di riferimento, caratterizzato dalla stessa geometria, localizzazione, orientamento, destinazione d'uso, condizioni al contorno, caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati conformemente all'Allegato 1, L. n. 90.

La Legge introduce modifiche sostanziali al Decreto Legislativo 192/2005, al fine di adeguarlo alla Direttiva 2010/31/EU.

Innanzitutto, bisogna evidenziare che la L. 90 modifica alcune definizioni introdotte già dal D.Lgs. 192/05 e ne aggiunge di nuove, tra cui:

- 1) **prestazione energetica di un edificio**, ossia la *“...quantità annua di energia primaria effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare, con un uso standard dell'immobile, i vari bisogni energetici dell'edificio, la climatizzazione invernale e estiva, la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, la ventilazione e, per il settore terziario, l'illuminazione, gli impianti ascensori e scale mobili. Tale quantità viene espressa da uno o più descrittori che tengono conto del livello di isolamento dell'edificio e delle caratteristiche tecniche e di installazione degli impianti tecnici. La prestazione energetica può essere espressa in energia primaria non rinnovabile, rinnovabile, o totale come somma delle precedenti”*;
- 2) **confine del sistema o confine energetico del sistema**, ossia il *“...confine che include tutte le aree di pertinenza dell'edificio, sia all'interno che all'esterno dello stesso, dove l'energia è consumata o prodotta”*;
- 3) **edificio a energia quasi zero**, ossia un *“edificio ad altissima prestazione energetica, calcolata conformemente alle disposizioni del presente decreto, che rispetta i requisiti definiti al decreto di cui all'articolo 4, comma 1. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo è coperto in misura significativa da energia da fonti rinnovabili, prodotta in situ”*;
- 4) **edificio di riferimento o target**, ossia *“edificio identico in termini di geometria (sagoma, volumi, superficie calpestabile, superfici degli elementi costruttivi e dei componenti),*

orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d'uso e situazione al contorno, e avente caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati”;

- 5) **energia consegnata o fornita**, ossia *“energia espressa per vettore energetico finale, fornita al confine dell’edificio agli impianti tecnici per produrre energia termica o elettrica per i servizi energetici dell’edificio”*;
- 6) **energia da fonti rinnovabili**, ossia *“energia proveniente da fonti rinnovabili non fossili, vale a dire energia eolica, solare, aerotermica, geotermica, idrotermica e oceanica, idraulica, biomassa, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas”*;
- 7) **energia esportata**, ossia *“quantità di energia, relativa a un dato vettore energetico, generata all’interno del confine del sistema e ceduta per l'utilizzo all’esterno dello stesso confine”*;
- 8) **energia primaria**, ossia *“energia, da fonti rinnovabili e non, che non ha subito alcun processo di conversione o trasformazione”*;
- 9) **energia prodotta in situ**, ossia *“energia prodotta o captata o prelevata all’interno del confine del sistema”*;
- 10) **fabbisogno annuale globale di energia primaria**, ossia *“quantità di energia primaria relativa a tutti i servizi considerati nella determinazione della prestazione energetica, erogata dai sistemi tecnici presenti all’interno del confine del sistema, calcolata su un intervallo temporale di un anno”*;
- 11) **fattore di conversione in energia primaria**, ossia *“rapporto adimensionale che indica la quantità di energia primaria impiegata per produrre un’unità di energia fornita, per un dato vettore energetico; tiene conto dell’energia necessaria per l’estrazione, il processamento, lo stoccaggio, il trasporto e, nel caso dell’energia elettrica, del rendimento medio del sistema di generazione e delle perdite medie di trasmissione del sistema elettrico nazionale e nel caso del teleriscaldamento, delle perdite medie di distribuzione della rete. Questo fattore può riferirsi all’energia primaria non rinnovabile, all’energia primaria rinnovabile o all’energia primaria totale come somma delle precedenti”*;
- 12) **involucro di un edificio**, ossia *“elementi e componenti integrati di un edificio che ne separano gli ambienti interni dall’ambiente esterno”*;
- 13) **livello ottimale in funzione dei costi**, ossia *“livello di prestazione energetica che comporta il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato, dove:*
 - 1) *il costo più basso è determinato tenendo conto dei costi di investimento legati all’energia, dei costi di manutenzione e di funzionamento e, se del caso, degli eventuali costi di smaltimento;*
 - 2) *il ciclo di vita economico stimato si riferisce al ciclo di vita economico stimato rimanente di un edificio nel caso in cui siano stabiliti requisiti di prestazione energetica per l’edificio nel suo complesso oppure al ciclo di vita economico stimato di un elemento edilizio nel caso in cui siano stabiliti requisiti di prestazione energetica per gli elementi edilizi;*
 - 3) *il livello ottimale in funzione dei costi si situa all’interno della scala di livelli di prestazione in cui l’analisi costi-benefici calcolata sul ciclo di vita economico è positiva”*;
- 14) **riqualificazione energetica di un edificio**, ossia *“un edificio esistente è sottoposto a riqualificazione energetica quando i lavori in qualunque modo denominati, a titolo*

indicativo e non esaustivo: manutenzione ordinaria o straordinaria, ristrutturazione e risanamento conservativo, ricadono in tipologie diverse da quelle indicate alla lettera”;

15) **ristrutturazione importante di un edificio**, ossia “*un edificio esistente è sottoposto a ristrutturazione importante quando i lavori in qualunque modo denominati (a titolo indicativo e non esaustivo: manutenzione ordinaria o straordinaria, ristrutturazione e risanamento conservativo) insistono su oltre il 25 per cento della superficie dell’involucro dell’intero edificio, comprensivo di tutte le unità immobiliari che lo costituiscono, a titolo esemplificativo e non esaustivo, e consistono, a titolo esemplificativo e non esaustivo, nel rifacimento di pareti esterne, di intonaci esterni, del tetto o dell’impermeabilizzazione delle coperture*”;

16) **vettore energetico**, ossia “*sostanza o energia fornite dall’esterno del confine del sistema per il soddisfacimento dei fabbisogni energetici dell’edificio*”;

17) **impianto termico**, ossia “*impianto tecnologico destinato ai servizi di climatizzazione invernale o estiva degli ambienti, con o senza produzione di acqua calda sanitaria, indipendentemente dal vettore energetico utilizzato, comprendente eventuali sistemi di produzione, distribuzione e utilizzazione del calore nonché gli organi di regolarizzazione e controllo. Sono compresi negli impianti termici gli impianti individuali di riscaldamento. Non sono considerati impianti termici apparecchi quali: stufe, caminetti, apparecchi di riscaldamento localizzato ad energia radiante; tali apparecchi, se fissi, sono tuttavia assimilati agli impianti termici quando la somma delle potenze nominali del focolare degli apparecchi al servizio della singola unità immobiliare e' maggiore o uguale a 5 kW. Non sono considerati impianti termici i sistemi dedicati esclusivamente alla produzione di acqua calda sanitaria al servizio di singole unità immobiliari ad uso residenziale ed assimilate*”.

La L. 90 prevede di minimizzare il fabbisogno energetico degli edifici tramite una progettazione accurata del sistema edificio-impianto e di massimizzare lo sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili.

Le principali novità introdotte, oggetto di specifici decreti attuativi, sono le seguenti:

1) nZEB. A partire dal 1° gennaio 2019 gli edifici di nuova costruzione di proprietà pubblica o occupati dalla Pubblica Amministrazione dovranno essere costruiti secondo il concetto nZEB; mentre, tutti gli altri edifici di nuova costruzione dovranno rispettare tale requisito dal 1° gennaio 2021;

2) metodologia di calcolo relativa alla prestazione energetica degli edifici: essa viene aggiornata in riferimento alle Norme UNI TS 11300 (parti da 1 a 4) e alla Raccomandazione 14 del Comitato Termotecnico Italiano (CTI);

3) requisiti minimi di prestazione energetica che devono essere definiti in base alle valutazioni tecniche ed economiche derivanti dall’applicazione di una metodologia comparativa (definita nel Regolamento EU 244/2012) ed aggiornati ogni 5 anni secondo i seguenti criteri:

- i requisiti minimi rispettano i principi di convenienza tecnica ed economica, fondati sull’analisi costi benefici del ciclo di vita economico degli edifici;

- per le nuove costruzioni e le ristrutturazioni importanti, i requisiti sono determinati con l’utilizzo di un “edificio di riferimento”, in funzione della tipologia edilizia e della fascia climatica;

- per il rispetto della qualità energetica prescritta sono previsti parametri specifici del fabbricato (indici di prestazione termica e di U) e parametri complessivi (indici di prestazione energetica globale, espressi sia in energia primaria totale che in energia primaria non rinnovabile);

4) Attestato di Prestazione Energetica (APE) da allegare al contratto di vendita o locazione ed anche nel caso di trasferimento a titolo gratuito. Pertanto, in materia di certificazione energetica cambiano molte cose, tra cui la denominazione, si passa da Attestato di Certificazione Energetica (ACE) ad APE, un documento redatto nel rispetto delle norme contenute nel decreto e rilasciato da esperti qualificati e indipendenti, attestante una serie di indicatori, quali:

- prestazione energetica globale dell'edificio (energia primaria totale ed energia primaria non rinnovabile);

- classe energetica determinata attraverso l'indice di prestazione energetica globale dell'edificio (espresso in energia primaria non rinnovabile);

- requisiti minimi di efficienza energetica;

- emissioni di anidride carbonica;

- energia esportata;

- raccomandazioni per il miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio con le proposte degli interventi più significativi ed economicamente convenienti. Per gli edifici utilizzati da pubbliche amministrazioni e aperti al pubblico con superficie utile totale superiore a 250 m², l'APE deve essere affisso con evidenza all'ingresso dell'edificio stesso o in un altro luogo chiaramente visibile al pubblico;

5) detrazioni fiscali. Recentemente, con la Legge di Stabilità 2015 [46] le detrazioni sono state prorogate fino al 31 dicembre 2015, con un'aliquota pari al 65 % (periodo della detrazione di 10 anni) per interventi di riqualificazione energetica che riguardano l'edilizia privata, parti comuni di edifici condominiali o tutte le unità immobiliari di cui si compone il condominio. La Legge ha confermato gli incentivi per tutti gli interventi già agevolati, estendendo il beneficio anche alle spese sostenute dal 1 gennaio 2015 al 31 dicembre 2015 per le schermature solari (valore massimo della detrazione di 60'000 euro) e per l'acquisto e la posa in opera di impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di generatori di calore alimentati da biomasse combustibili (valore massimo della detrazione di 30'000 euro).

Fortemente modificato risulta l'articolo 15 del D.Lgs. 192/2005, in materia di sanzioni. Secondo tale modifica, sono previste le seguenti sanzioni:

- il professionista che rilascia la relazione tecnica o un APE senza il rispetto delle modalità stabilite, è punito con una sanzione amministrativa variabile tra 700 euro e 4'200 euro;

- il direttore dei lavori che omette di presentare al comune l'asseverazione di conformità delle opere rispetto all'attestato di qualificazione energetica, prima del rilascio del certificato di agibilità, è punito con sanzione amministrativa 1'000-6'000 euro;

- il proprietario o il conduttore dell'unità immobiliare qualora non provveda alle operazioni di controllo e manutenzione degli impianti di climatizzazione è punito con la sanzione amministrativa variabile tra 500-3'000 euro;

- l'operatore incaricato del controllo e manutenzione che non provvede a redigere il rapporto di controllo tecnico è punito con sanzione amministrativa pari a 1'000-6'000 euro;

- in assenza di APE per edifici di nuova costruzione o sottoposti a ristrutturazione importante ed in caso di vendita, il costruttore o il proprietario è punito con la sanzione amministrativa tra

3'000-18'000 euro, mentre nel caso di locazione, il proprietario è punito con la sanzione amministrativa non inferiore a 300 euro e non superiore a 1'800 euro;

- in caso di assenza dei parametri energetici nell'annuncio di offerta di vendita o locazione, il responsabile è punito con la sanzione amministrativa non inferiore a 500 euro e non superiore a 3'000 euro.

Il 26 giugno 2015 sono stati emanati i tre Decreti attuativi della L. 90/2013. Tali provvedimenti costituiscono un passo fondamentale per la diffusione dei nZEBs in Italia e riguardano:

1. decreto sui requisiti minimi e le metodologie di calcolo della prestazione energetica. Sostituisce il DPR 59/2009 e definisce i nuovi requisiti degli edifici in termini di prestazioni energetiche e le relative metodologie di calcolo. I nuovi requisiti minimi si applicano in due fasi: la prima dal 1/10/2015; la seconda, più restrittiva, dal 1/01/2019 per gli edifici pubblici e dal 1/01/2021 per tutti gli altri edifici. I requisiti sono diversi nel caso in cui si interviene su edifici di nuova costruzione e su edifici esistenti sottoposti ad interventi di riqualificazione energetica;

2. decreto sulla relazione tecnica di progetto. Adegua gli schemi di relazione tecnica di progetto al nuovo quadro normativo, in funzione delle diverse tipologie di opere: nuove costruzioni, ristrutturazioni importanti e riqualificazioni energetiche;

3. decreto sulla certificazione energetica. Sostituisce il DM 26/06/2009 [47] e definisce le nuove linee guida per la certificazione energetica degli edifici. Introduce l'Attestato di Prestazione Energetica (APE), che esprime la prestazione energetica globale dell'edificio e sarà unico per tutto il territorio nazionale, con una metodologia di calcolo omogenea, a cui le Regioni dovranno adeguarsi entro due anni. Le classi energetiche passano da sette a dieci, dalla A4 (la migliore) alla G (la peggiore).

3.4.3 L'edificio di riferimento

La normativa sul risparmio energetico in edilizia, attualmente è oggetto di una progressiva trasformazione, causata dalla necessità di stabilire valori di riferimento (*benchmark*) per valutare le prestazioni energetiche e stimare i costi energetici del sistema edificio-impianto analizzato.

Usualmente si tende a confrontare la richiesta energetica dell'edificio oggetto di studio con quelli di letteratura, che difficilmente rispondono sia alle condizioni climatiche che alle caratteristiche termiche/energetiche degli edifici localizzati nel nostro Paese.

Con il Regolamento delegato n. 244/2012 [45], ciascuno stato è chiamato a definire gli edifici di riferimento, uno per gli edifici ex novo ed almeno due per gli edifici esistenti sottoposti a ristrutturazione completa, per le seguenti categorie:

- 1) abitazioni monofamiliari;
- 2) condomini di appartamenti e multifamiliari;
- 3) edifici adibiti a uffici.

Gli edifici individuati possono essere anche classificati e differenziati in funzione di alcuni parametri, quali: caratteristiche dimensionali; età; materiali; zone climatiche e modelli d'uso, in modo da ricostruire un attendibile quadro di riferimento del contesto edilizio considerato. È possibile ampliare le tipologie edilizie cui far riferimento, per le quali esistono specifici requisiti

di prestazione energetica quali: scuole; ospedali; alberghi; ristoranti; esercizi commerciali ed altri fabbricati che impiegano energia.

La recente legislazione, che modifica il D.Lgs 192/2005, definisce l'edificio di riferimento come un *“edificio identico in termini di geometria (sagoma, volumi, superficie calpestabile, superfici degli elementi costruttivi e dei componenti), orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d'uso e situazione al contorno, e avente caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati”* [44].

Ai fini della metodologia per il calcolo del cost-optimal, come richiesto dalla Direttiva EPBD recast e dal Regolamento 244/2012 della commissione del 16 gennaio 2012, ciascuno Stato membro è chiamato a definire gli edifici di riferimento rappresentativo del parco immobiliare [48].

Bisogna sottolineare un aspetto molto importante, ossia che il livello di dettaglio delle informazioni relative all'edificio, dipende dal tipo di metodo che si utilizza e, quindi, dal tipo di analisi da svolgere. Paragonando, ad esempio, il metodo quasi stazionario con quello suggerito dalla EPBD recast, ossia quello in regime dinamico, il numero di informazioni ed il dettaglio delle stesse, nel primo caso sono molto minori rispetto al secondo. Questo implica che anche la definizione dell'edificio di riferimento, nel caso della metodologia dinamica, richiederebbe un'accurata diagnosi energetica del patrimonio edilizio con lo scopo di acquisire informazioni relative alle caratteristiche del sistema edificio-impianto ed alle reali condizioni di funzionamento in funzione della destinazione d'uso dell'edificio stesso.

Quanto detto in precedenza necessita di sistemi informatici di acquisizione dati per poter creare piattaforme facilmente gestibili dalle quali reperire le informazioni opportune.

Corgnati et al. [49] individuano tre modelli di edificio di riferimento:

1. Example Building: modello di edificio fittizio definito da esperti del settore con l'ausilio di appositi manuali di progettazione e documenti normativi;
2. Real Building: edificio realmente esistente, rappresentativo di una specifica categoria di edifici in funzione dell'epoca di costruzione e della dimensione (caratteristiche pari a quelle medie del campione di edifici, come emerso dalle analisi statistiche);
3. Theoretical Building: edificio di tipo virtuale, definito attraverso dati di base statistica.

Con lo scopo di studiare l'applicabilità dei nZEBs, il Building Performance Institute Europe (BPIE) [50] ha introdotto due edifici di riferimento per gli edifici ex-novo, rientranti negli Example Buildings, simulati in tre città (Madrid, Copenhagen e Stoccarda).

I parametri che definiscono le prestazioni del sistema edificio-impianto sono stati scelti in modo da essere significativamente migliori dei limiti minimi prescritti dalle norme nazionali.

Il fine è stato quello di posizionare l'efficienza energetica degli edifici di riferimento nell'intervallo tra il livello ottimale richiesto dalle Direttiva 2010/31/UE e quello della migliore tecnologia disponibile.

In particolare, il primo edificio target monofamiliare indipendente (Figura 3.4.3.1), è un bungalow con un'area netta di 129 m². È ritenuto uno degli esempi più critici per raggiungere le prestazioni dei nZEBs, a causa del suo alto rapporto di forma (S/V) e, dunque, della sua elevata superficie disperdente.

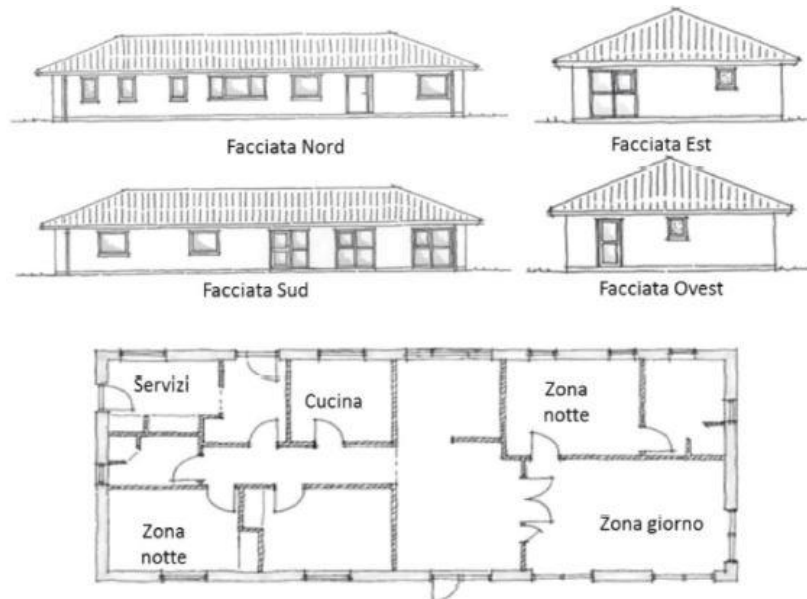


Fig. 3.4.3.1: Edificio monofamiliare di riferimento [50]

Invece, il secondo edificio di riferimento (Fig. 3.4.3.2) è quello per gli edifici non residenziali. Poiché nel settore non residenziale possiamo ritrovare un'ampia casistica di tipologie edilizie ed in tal caso diventa una grande sfida determinare per ciascuna tipologia un edificio target, si è scelto come edificio di riferimento di questo settore un edificio multipiano molto simile sia agli edifici residenziali plurifamiliari che a quelli non residenziali, quali: alberghi, scuole ed ospedali [51].

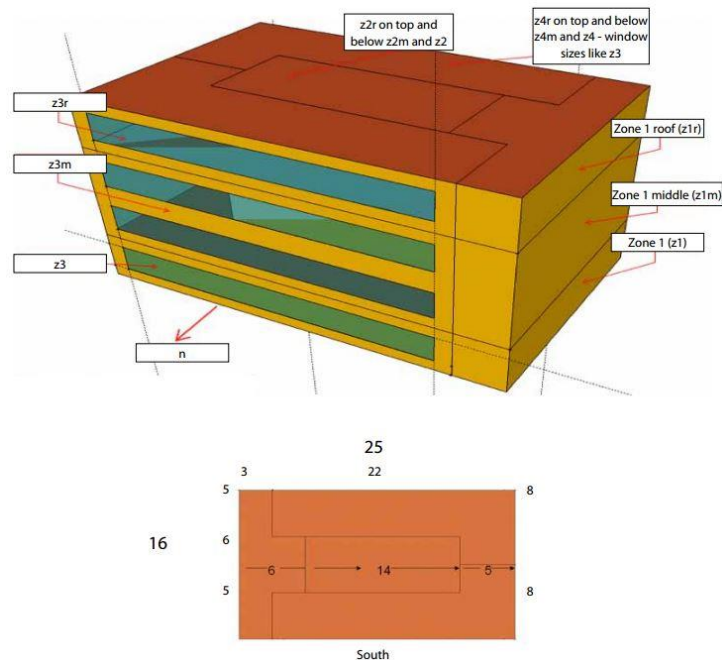


Fig. 3.4.3.2: Edificio non residenziale di riferimento [51]

In Italia, la definizione di Reference Building incontra alcune difficoltà a causa della peculiarità del contesto edilizio italiano, ossia per la presenza di:

- grande numero di edifici storici;
- basso tasso di turn-over in edilizia;
- mancanza di controlli sul rispetto legislativo;
- significative differenze climatiche e di tipologie costruttive tra le regioni;
- diversi valori di U e differenti sistemi impiantistici impiegati sul territorio nazionale, senza una correlazione tra l'età dell'edificio ed il livello di isolamento.

Svariati sono i progetti europei attivati negli ultimi anni in Europa, ossia:

- EASEE;
- ENTRANZE;
- EPISCOPE;
- CommONEnergy;
- COHERENO;
- ZEBRA2020.

Il progetto Intelligent Energy Europe EPISCOPE (2013-2016), successivamente al progetto TABULA (2009-2012) [52], ha lo scopo di contribuire al monitoraggio, all'ottimizzazione dei processi di riqualificazione energetica ed al risparmio energetico effettivo nel parco immobiliare nazionale.

Il progetto Typology approach for building stock energy assessment (Approccio tipologico per la valutazione energetica del parco immobiliare, TABULA) ha individuato le tipologie edilizie residenziali di 13 paesi, tra cui l'Italia.

I risultati principali del progetto TABULA sono i seguenti:

- struttura della tipologia edilizia/impiantistica: tale struttura considera i diversi tipi di costruzione diffusi nel paese;
- dati relativi alla tipologia edilizia: considerando i dati nazionali di ciascun paese partecipante, comprendenti:
 - dati tipologico-dimensionali;
 - parametri termo-fisici dei componenti d'involucro;
 - prestazioni degli impianti termici;
 - distribuzione statistica dei diversi tipi di edificio ed impianto nel parco edilizio nazionale;
 - possibili interventi di risparmio energetico, distinti in due livelli, "tipico" e "avanzato";
- webtool delle tipologie edilizie: i dati relativi alle tipologie edilizie sono pubblicati attraverso uno speciale Webtool delle tipologie edilizie [53]. Per ciascun Paese, la tipologia nazionale è rappresentata con una matrice di fotografie degli edifici-tipo, considerando il periodo di costruzione e le dimensioni dell'edificio. Per ogni tipo di edificio sono riportate le informazioni relative a: distribuzione statistica, impianti termici tipici e prestazioni energetiche medie. È riportato anche il potenziale risparmio energetico e la conseguente riduzione dell'emissione di biossido di carbonio. Ogni tipologia edilizia è caratterizzata da

dimensioni, fattori di forma, proprietà termo-fisiche, efficienza degli impianti di riscaldamento ed altri indicatori energetici.

I dati fanno riferimento alcune volte al territorio nazionale, altre volte alla Regione Piemonte caratterizzata da un'area climatica definita media (zona climatica E), in quanto circa il 74 % dei comuni di questa Regione ricadono in tale zona climatica.

A livello nazionale sono stati considerati:

- numero di edifici residenziali pari a 11'226'595;
- numero di appartamenti pari a 27'291'993;
- superficie media degli appartamenti a livello nazionale pari a 96 m².

I dati, in fase di aggiornamento, a valle del censimento nazionale 2011 faranno riferimento a:

- numero di edifici residenziali pari a 11'720'482;
- numero di appartamenti pari a 29'074'722;
- superficie media degli appartamenti a livello nazionale pari a 99 m².

Una delle finalità principali, del progetto, è stata quella di stimare il consumo di energia degli edifici di ciascuna Nazione e, di conseguenza, valutare l'impatto delle misure di efficienza energetica ed il potenziale risparmio ottenibile con la riqualificazione degli edifici esistenti.

Di particolare interesse sono i fascicoli nazionali sulla tipologia edilizia [54].

I Reference Buildings italiani sono principalmente dei Real Buildings, dal punto di vista delle caratteristiche geometriche, ed Example e Theoretical Buildings in relazione all'epoca di costruzione ed alla tipologia edilizia considerata (Figs. 3.4.3.3-3.4.3.4-3.4.3.5).

CLASSE DI DIMENSIONE EDILIZIA					
CLASSE DI EPOCA DI COSTRUZIONE	Area climatica media	CASE MONOFAMILIARI	CASE A SCHIERA	EDIFICI MULTIFAMILIARI	BLOCCHI DI APPARTAMENTI
	1 Fino al 1900				
	2 1901-1920				
	3 1921-1945				
	4 1946-1960				
	5 1961-1975				
	6 1976-1990				
	7 1991-2005				
	8 Dopo il 2005				

Fig. 3.4.3.3: Matrice tipologia edilizia (area climatica E). Archetipi illustrati con volumetrico [54]

CLASSE DI DIMENSIONE EDILIZIA					
Area climatica media		CASE MONOFAMILIARI	CASE A SCHIERA	EDIFICI MULTIFAMILIARI	BLOCCHI DI APPARTAMENTI
CLASSE DI EPOCA DI COSTRUZIONE	1 Fino al 1900				
	2 1901-1920				
	3 1921-1945				
	4 1946-1960				
	5 1961-1975				
	6 1976-1990				
	7 1991-2005				
	8 Dopo il 2005				

Fig. 3.4.3.4: Matrice tipologia edilizia (area climatica E). Archetipi illustrati con immagine reale [54]

	DESCRIZIONE	IMMAGINE	PERIODO DI MAGGIORE DIFFUSIONE		U [W/(m ² K)]
	Muratura in calcestruzzo (30 cm)		1955	1975	2,80
	Muratura a cassa-vuota con mattoni forati (30 cm), basso livello di isolamento		1976	1990	0,78
	Muratura a cassa-vuota con mattoni forati (40 cm), basso livello di isolamento		1976	1990	0,76
	Muratura in mattoni forati (25 cm), basso livello di isolamento		1976	1990	0,80
	Muratura in mattoni forati (40 cm), basso livello di isolamento		1976	1990	0,76
	Muratura in calcestruzzo (anche prefabbricata, 18 cm), basso livello di isolamento		1976	1990	0,82
	Muratura in calcestruzzo (anche prefabbricata, 30 cm), basso livello di isolamento		1976	1990	0,79
	Muratura a cassa-vuota con mattoni forati (30 e oltre), medio livello di isolamento		1991	2005	0,59
	Muratura in mattoni forati (25 cm), medio livello di isolamento		1991	2005	0,61
	Muratura in mattoni forati (40 cm), medio livello di isolamento		1991	2005	0,59
	Muratura in calcestruzzo (anche prefabbricata, 18-20 cm), medio livello di isolamento		1991	2005	0,62
	Muratura in calcestruzzo (anche prefabbricata, 30 cm), medio livello di isolamento		1991	2005	0,60
	Muratura in mattoni alveolari (alta resistenza termica), alto livello di isolamento		2006	-	0,34
	Muratura in calcestruzzo (anche prefabbricata), alto livello di isolamento		2006	-	0,34

Fig. 3.4.3.5: Esempio di tipologie costruttive dell'involucro [54]

Il Regolamento 244/2012 [45] prevede che sia possibile impiegare le due modalità, sottoelencate, a seconda del tipo di categoria di edificio:

- reali, ossia edifici più diffusi in una data categoria;
- virtuali, ovvero edifici sempre rappresentativi di una determinata categoria, ma non realmente esistenti [55] [56] [57] [58] [59].

Per l'applicazione del cost-optimal al caso italiano, sono state individuate le tipologie edilizie residenziali e ad uso uffici (uno nuovo e due esistenti di diverse epoche), e sono state collocate in due zone climatiche (B ed E, ai sensi del D.P.R. 412/93), per quattro tipologie edilizie (abitazione monofamiliare, piccolo condominio, grande condominio, edificio ad uso ufficio), per un totale di 24 edifici di riferimento [48] (Fig. 3.4.3.6).

CATEGORIE DI RIFERIMENTO		NUMERO EDIFICI	ZONE CLIMATICHE		NUMERO DI MODELLI	
			B	E	NUOVI	ESISTENTI
Abitazione monofamiliare esistente	virtuale	2	1	1	-	4
Abitazione monofamiliari nuova	virtuale	1	1	1	2	-
Piccolo condominio esistente	virtuale	2	1	1	-	4
Piccolo condominio nuovo	virtuale	1	1	1	2	-
Grande condominio esistente	virtuale	2	1	1	-	4
Grande condominio nuovo	virtuale	1	1	1	2	-
Edificio ad uso ufficio esistente	virtuale	2	1	1	-	4
Edificio ad uso ufficio nuovo	virtuale	1	1	1	2	-
RESIDENZIALE					6	12
TOTALE RESIDENZIALE					18	
UFFICI					2	4
TOTALE UFFICI					6	
TOTALE NUOVI/ESISTENTI					8	16
TOTALE					24	

Tab. 3.4.3.1: Tipologie edilizie per l'applicazione della metodologia cost-optimal in Italia [48]

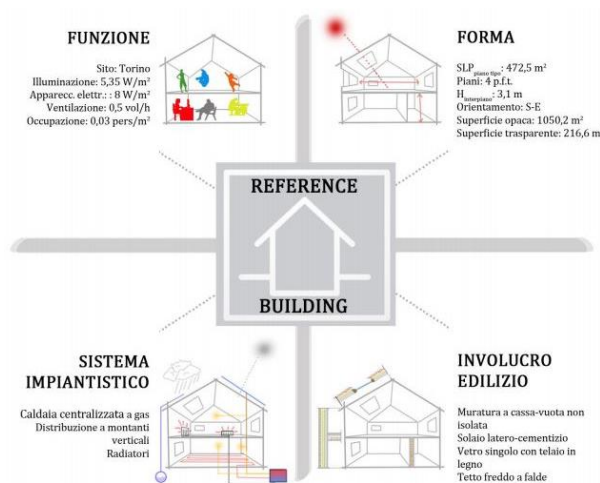


Fig. 3.4.3.6: Parametri di un reference building [48]

Dalla Tab. 3.4.3.1 si evince che per ciascuna tipologia edilizia, ed in funzione anche dell'epoca di costruzione, sono stati determinati due edifici per la categoria "esistente" ed un edificio per la categoria "nuovo". Tali edifici di riferimento localizzati in zona E sono stati utilizzati anche per la zona B, in seguito a modifiche svolte sulle caratteristiche termiche ed energetiche del sistema edificio-impianto per poterli adattare al nuovo contesto climatico.

In TABULA [54] è stato utilizzato il metodo quasi stazionario, mentre nel lavoro [48] sono presentate simulazione energetiche in regime dinamico tramite l'ausilio del codice EnergyPlus, che hanno richiesto, rispetto al progetto TABULA, un maggior grado di dettaglio delle informazioni di input e del modello dell'edificio di riferimento:

1. indice di affollamento di 0.04 pers/m², in conformità con la norma UNI 10339 [60];
2. carichi interni relativi all'illuminazione ed all'utilizzo di apparecchiature elettriche sono rispettivamente pari a 5.35 W/m² e 8 W/m². Valori sono associati ad appositi profili di utilizzo e di occupazione estratti dal modello di Reference Building del Department of Energy (DOE) degli Stati Uniti per edifici multi-familiari, noto come Mid-rise apartment, adeguatamente contestualizzato alle abitudini del nostro Paese [61];
3. funzionamento dell'impianto in regime invernale dal 15 Ottobre al 15 Aprile in conformità con l'UNI/TS 11300-1 [62];
4. temperatura di progetto dell'ambiente interno è fissata a 21°C dalle ore 07:00 alle ore 22:00, ed a 18°C nelle restanti ore;
5. ventilazione è assunta come naturale con un tasso di ricambio pari a 0.5 vol/ora.

3.4.3.1 Requisiti dell'edificio di riferimento in Italia

Nel paragrafo 3 del Decreto Requisiti minimi [63], sono riportati i “*Requisiti e prescrizioni specifici per gli edifici di nuova costruzione o soggetti a ristrutturazioni importanti di primo livello. Requisiti degli edifici a energia quasi zero*”. Al paragrafo 3.3 viene precisato che in caso di nuova costruzione, demolizione e ricostruzione, ampliamento e sopraelevazione e di ristrutturazione importante di primo livello i requisiti sono determinati con l'utilizzo dell'edificio di riferimento.

Per le varie categorie di edifici, si procede nel determinare i parametri e gli indici di prestazione energetica (Tab. 3.4.3.1.1), espressi in kWh/m²anno, quali:

Il Decreto requisiti minimi prevede di effettuare varie verifiche:

- 1) verifica del coefficiente globale di scambio termico H'_T sia inferiore ad un valore limite ammissibile riportato in Tab. 3.4.3.1.2:

$$H'_T = H_{tr,adj} / \sum_k A_k < \text{valore limite} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

dove:

- $H_{tr,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione dell'involucro calcolato con la UNI/TS 11300-1 (W/K);
- A_k è la superficie del k-esimo componente (opaco o trasparente) costituente l'involucro (m²).

H_T [W/ m ² K]	coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente
$A_{sol,est}/ A_{sup utile}$ [-]	area solare equivalente estiva per unità di superficie utile;
$EP_{H,nd}$ [kWh/m ²]	indice di prestazione termica utile per riscaldamento;
η_H [-]	efficienza media stagionale dell'impianto di climatizzazione invernale;
EP_H [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot") ;
$EP_{W,nd}$ [kWh/m ²]	indice di prestazione termica utile per la produzione di acqua calda sanitaria;
η_W [-]	efficienza media stagionale dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria;
EP_W [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica per la produzione dell'acqua calda sanitaria. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot") ;
EP_V [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica per la ventilazione. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot") ;
$EP_{C,nd}$ [kWh/m ²]	indice di prestazione termica utile per il raffrescamento;
η_C [-]	efficienza media stagionale dell'impianto di climatizzazione estiva (compreso l'eventuale controllo dell'umidità);
EP_C [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva (compreso l'eventuale controllo dell'umidità). Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot") ;
EP_L [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica per l'illuminazione artificiale. Questo indice non si calcola per la categoria E.1, fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3). Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot") ;
EP_T [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica del servizio per il trasporto di persone e cose (impianti ascensori, marciapiedi e scale mobili). Questo indice non si calcola per la categoria E.1, fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3);
$EP_g = EP_H + EP_W + EP_V + EP_C + EP_L + EP_T$ [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica globale dell'edificio. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot").

Tab. 3.4.3.1.1: Parametri ed indici di prestazione energetica [63]

Numero Riga	RAPPORTO DI FORMA (S/V)	Zona climatica				
		A e B	C	D	E	F
1	$S/V \geq 0,7$	0,58	0,55	0,53	0,50	0,48
2	$0,7 > S/V \geq 0,4$	0,63	0,60	0,58	0,55	0,53
3	$0,4 > S/V$	0,80	0,80	0,80	0,75	0,70
Numero Riga	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	Zona climatica				
		A e B	C	D	E	F
4	Ampliamenti e Ristrutturazioni importanti di secondo livello per tutte le tipologie edilizie	0,73	0,70	0,68	0,65	0,62

Tab. 3.4.3.1.2: Valore massimo ammissibile del coefficiente globale di scambio termico H_T [63]

- 2) calcolo dell'area solare equivalente estiva e verifica che sia inferiore ad un suo valore limite in funzione della tipologia edilizia, come esplicitato in Tab. 3.4.3.1.3:

$$A_{sol,est} = \sum_k F_{sh,ob} \times g_{gl+sh} \times (1 - F_F) \times A_{w,p} \times F_{sol,est} < \text{valori limite } [m^2]$$

dove:

- $F_{sh,ob}$ è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie vetrata k-esima, riferito al mese di luglio;

- g_{gl+sh} è la trasmittanza di energia solare totale della finestra calcolata nel mese di luglio, quando la schermatura solare è utilizzata;
- FF è la frazione di area relativa al telaio, rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato;
- $A_{w,p}$ è l'area proiettata totale del componente vetrato (area del vano finestra);
- $F_{sol,est}$ è il fattore di correzione per l'irraggiamento incidente, ricavato come rapporto tra l'irradianza media nel mese di luglio, nella località e sull'esposizione considerata, e l'irradianza media annuale di Roma, sul piano orizzontale.

#	Categoria edificio	Tutte le zone climatiche
1	Categoria E.1 fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3)	$\leq 0,030$
2	Tutti gli altri edifici	$\leq 0,040$

Tab. 3.4.3.1.3: Valore massimo ammissibile del rapporto tra area solare equivalente estiva dei componenti finestrati e l'area della superficie utile $A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$ (-) [63]

- 3) Verifica che gli indici $EP_{H,nd}$, $EP_{C,nd}$ e $EP_{gl,tot}$ risultino inferiori ai corrispondenti valori limite calcolati per l'edificio di riferimento ($EP_{H,nd,limite}$, $EP_{C,nd,limite}$ e $EP_{gl,tot,limite}$). Si prevedono due fasi:
 - a) I fase: in vigore dal 1° luglio 2015 con valori limite validi per tutti gli edifici;
 - b) II fase: in vigore dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici (o uso pubblico) e dal 1° gennaio 2021 anche per tutti gli altri edifici.

Per il calcolo di tali valori limite si considerano i parametri energetici, le caratteristiche termiche e quelle di generazione presenti nel capitolo 1 dell'appendice A del Decreto requisiti minimi, suddivisi in:

- a) parametri relativi al fabbricato (Tab. 3.4.3.1.4);
- b) parametri relativi agli impianti tecnici (Tab. 3.4.3.1.5 – 3.4.3.1.6).

U - Componenti opachi verticali			U - Componenti opachi orizzontali di copertura		
Zona climatica	U (W/m ² K)		Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾		2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾
A e B	0,45	0,43	A e B	0,38	0,35
C	0,38	0,34	C	0,36	0,33
D	0,34	0,29	D	0,30	0,26
E	0,30	0,26	E	0,25	0,22
F	0,28	0,24	F	0,23	0,20

U - Componenti opachi orizzontali di terra			U - Componenti finestrati		
Zona climatica	U (W/m ² K)		Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾		2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾
A e B	0,46	0,44	A e B	3,20	3,00
C	0,40	0,38	C	2,40	2,20
D	0,32	0,29	D	2,00	1,80
E	0,30	0,26	E	1,80	1,40
F	0,28	0,24	F	1,50	1,10

U - Componenti di separazione			g _{gl+sh} - Fattore trasmissione solare finestre		
Zona climatica	U (W/m ² K)		Zona climatica	g _{gl+sh}	
	2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾		2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾
Tutte le zone	0,8	0,8	Tutte le zone	0,35	0,35

(1) dal 1 luglio 2015 per tutti gli edifici
(2) dal 1 gennaio 2019 per gli edifici pubblici e a uso pubblico e dal 1 gennaio 2021 per tutti gli altri edifici

Tab. 3.4.3.1.4: Valori dei parametri caratteristici dell'edificio di riferimento [63]

I fabbisogni energetici primari EP e quelli termici $Q_{H,nd}$ e $Q_{C,nd}$ dell'edificio di riferimento si calcolano, considerando la normativa tecnica di cui all'art. 3, impiegando i seguenti parametri ed i fattori di conversione in energia primaria, riportati in Tab. 3.4.3.1.7.

Per i servizi di climatizzazione invernale e climatizzazione estiva si utilizzano i parametri del fabbricato di riferimento, riportati precedentemente; mentre, per il servizio di acqua calda sanitaria, si considera il fabbisogno di energia termica utile $Q_{W,nd}$ pari a quello reale.

- 4) verifica dei rendimenti del sistema di riscaldamento, raffrescamento e di produzione acqua calda sanitaria, che devono essere superiori a quelli definiti per l'edificio di riferimento. Le efficienze medie dei sistemi di generazione e di utilizzo, invece, sono riportate nelle seguenti Tab. 3.4.3.1.5 – 3.4.3.1.6 e fanno riferimento all'edificio target e considerano anche l'effetto dei consumi elettrici ausiliari.

$$\eta_H > \eta_{H,limte}$$

$$\eta_C > \eta_{C,limte}$$

$$\eta_W > \eta_{W,limte}$$

Efficienza dei sottosistemi di utilizzazione η_u :	H	C	W
Distribuzione idronica	0,81	0,81	0,70
Distribuzione aeraulica	0,83	0,83	-
Distribuzione mista	0,82	0,82	-

Tab. 3.4.3.1.5: Efficienza dei sottosistemi di utilizzo dell'edificio di riferimento [63]

	Produzione di energia termica			Produzione di energia elettrica in situ
	H	C	W	
Sottosistemi di generazione:				
- Generatore a combustibile liquido	0,82	-	0,80	-
- Generatore a combustibile gassoso	0,95	-	0,85	-
- Generatore a combustibile solido	0,72	-	0,70	-
- Generatore a biomassa solida	0,72	-	0,65	-
- Generatore a biomassa liquida	0,82	-	0,75	-
- Pompa di calore a compressione di vapore con motore elettrico	3,00	(*)	2,50	-
- Macchina frigorifera a compressione di vapore a motore elettrico	-	2,50	-	-
- Pompa di calore ad assorbimento	1,20	(*)	1,10	-
- Macchina frigorifera a fiamma indiretta	-	$0,60 \times \eta_{gn}$ (**)	-	-
- Macchina frigorifera a fiamma diretta	-	0,60	-	-
- Pompa di calore a compressione di vapore a motore endotermico	1,15	1,00	1,05	-
- Cogeneratore	0,55	-	0,55	0,25
- Riscaldamento con resistenza elettrica	1,00	-	-	-
- Teleriscaldamento	0,97	-	-	-
- Teleraffrescamento	-	0,97	-	-
- Solare termico	0,3	-	0,3	-
- Solare fotovoltaico	-	-	-	0,1
- Mini eolico e mini idroelettrico	-	-	-	(**)
NOTA: Per i combustibili tutti i dati fanno riferimento al potere calorifico inferiore				
(*) Per pompe di calore che prevedono la funzione di raffrescamento di considera lo stesso valore delle macchine frigorifere della stessa tipologia				
(**) si assume l'efficienza media del sistema installato nell'edificio reale				

Tab. 3.4.3.1.6: Efficienze dei sottosistemi di generazione dell'edificio di riferimento [63]

- 5) verifica che l'energia primaria globale ($EP_{gl,tot}$) sia inferiore al limite ($EP_{gl,tot,limite}$), impiegando i fattori di conversione in energia primaria totale, come riportato di seguito:

$$EP_{gl,tot} < EP_{gl,tot,limite}$$

Vettore energetico	$f_{P,nren}$	$f_{P,ren}$	$f_{P,tot}$
Gas naturale ⁽¹⁾	1,05	0	1,05
GPL	1,05	0	1,05
Gasolio e Olio combustibile	1,07	0	1,07
Carbone	1,10	0	1,10
Biomasse solide ⁽²⁾	0,20	0,80	1,00
Biomasse liquide e gassose ⁽²⁾	0,40	0,60	1,00
Energia elettrica da rete ⁽³⁾	1,95	0,47	2,42
Teleriscaldamento ⁽⁴⁾	1,5	0	1,5
Rifiuti solidi urbani	0,2	0,2	0,4
Teleraffrescamento ⁽⁴⁾	0,5	0	0,5
Energia termica da collettori solari ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico e mini-idraulico ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – free cooling ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – pompa di calore ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
⁽¹⁾ I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE. ⁽²⁾ Come definite dall'allegato X del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152. ⁽³⁾ I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE. ⁽⁴⁾ Fattore assunto in assenza di valori dichiarati dal fornitore e asseverati da parte terza, conformemente al quanto previsto al paragrafo 3.2. ⁽⁵⁾ Valori convenzionali funzionali al sistema di calcolo.			

Tab. 3.4.3.1.7: Fattori di conversione in energia primaria dei vettori energetici [63]

Per la classificazione energetica si impiega l'indice di prestazione energetica globale dell'edificio, riferito all'energia primaria non rinnovabile, $EP_{gl,nren}$.

6) Il progettista, al fine di limitare le richieste energetiche per la climatizzazione estiva:

- valuta l'efficacia dei sistemi schermanti delle superfici vetrate, esterni o interni;
- nelle zone climatiche A, B, C, D, E, per tutti gli edifici, eccetto le categorie E.6 ed E.8, caratterizzate da un valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva $\geq 290 \text{ W/m}^2$, sono previste le seguenti alternative:

- per le pareti opache verticali (eccetto quelle a nord-ovest/nord/nord-est):
 - massa superficiale $M_s > 230 \text{ kg/m}^2$;
 - trasmissione termica periodica $Y_{IE} < 0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- per le pareti opache orizzontali ed inclinate:
 - trasmissione termica periodica $Y_{IE} < 0.18 \text{ W/m}^2\text{K}$;
 - qualora l'utilizzo di tecniche e materiali innovativi, ad esempio coperture verdi, consentono di contenere le oscillazioni di temperature, è possibile adottarle, attestando l'equivalenza degli effetti alle disposizioni sopra riportate.

7) verifica per tutte le categorie di edifici (eccetto E.8), nel caso di nuova costruzione e ristrutturazioni importanti di primo livello (limitatamente a demolizione e ricostruzione in zona C, D, E, F) che il valore della trasmissione (U) delle strutture di separazione tra edifici o unità immobiliari confinanti sia inferiore o uguale a $0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$, nel caso di pareti divisorie verticali e orizzontali. Il medesimo limite deve essere rispettato per tutte le

strutture opache, verticali, orizzontali e inclinate, che delimitano verso l'ambiente esterno gli ambienti non dotati di impianto di climatizzazione adiacenti agli ambienti climatizzati.

- 8) per edifici ex-novo ed edifici sottoposti a ristrutturazioni importanti di primo livello, il Progettista, mediante i pertinenti fattori di conversione in energia primaria totale, rinnovabile e non rinnovabile, assevera l'osservanza degli obblighi del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28 [64].

Sono “edifici a energia quasi zero” tutti gli edifici, di nuova costruzione oppure esistenti, per i quali sono rispettate le verifiche

- a) tutti i requisiti previsti dalle verifiche precedenti dalla n. 1 alla n. 4;
- b) gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nel rispetto dei principi minimi di del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28 [64].

Capitolo 4

Simulazione energetica degli edifici in regime stazionario e dinamico

La simulazione energetica di un edificio è una rappresentazione matematica del comportamento fisico di ogni suo componente.

L'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) in [65] elenca i principali metodi utilizzati nell'analisi energetica degli edifici, dividendoli in metodi in regime stazionario, a cui appartengono tutte quelle procedure che vengono usate per una rapida stima del fabbisogno energetico, e metodi in regime dinamico (Tab. 4.1).

Method	Forward	Data-Driven			Comments
		Empirical or Black-Box	Calibrated Simulation	Physical or Grey-Box	
Steady-State Methods					
Simple linear regression	–	X	–	–	One dependent parameter, one independent parameter. May have slope and y-intercept.
Multiple linear regression	–	X	–	–	One dependent parameter, multiple independent parameters.
Modified degree-day method	X	–	–	–	Based on fixed reference temperature of 18.3°C.
Variable-base degree-day method, or 3-P change point models	X	X	–	X	Variable base reference temperatures.
Change-point models: 4-P, 5-P	–	X	–	X	Uses daily or monthly utility billing data and average period temperatures.
ASHRAE bin method and data-driven bin method	X	X	–	–	Hours in temperature bin times load for that bin.
ASHRAE TC 4.7 modified bin method	X	–	–	–	Modified bin method with cooling load factors.
Multistep parameter identification	–	–	–	X	Uses daily data to determine overall heat loss and ventilation of large buildings.
Dynamic Methods					
Thermal network	X	–	–	X	Uses equivalent thermal parameters (data-driven mode).
Response factors	X	–	–	–	Tabulated or as used in simulation programs.
Fourier analysis	X	–	X	X	Frequency domain analysis convertible to time domain.
ARMA model	–	–	–	X	AutoRegressive Moving Average (ARMA) model.
PSTAR model	X	–	X	X	Combination of ARMA and Fourier series; includes loads in time domain.
Modal analysis	X	–	–	X	Building described by diagonalized differential equation using nodes.
Differential equation	–	–	–	X	Analytical linear differential equation.
Computer simulation (DOE-2, BLAST, EnergyPlus)	X	–	X	–	Hourly and subhourly simulation programs with system models.
Computer emulation (HVACSIM+, TRNSYS)	X	–	–	–	Subhourly simulation programs.
Artificial Neural Networks	–	X	–	–	Connectionist models.

Tab. 4.1: Classificazione dei metodi per la simulazione energetica [65]

Dunque, per valutare il fabbisogno energetico di un edificio, possono essere adoperati due approcci:

1. semplificato o quasi stazionario: si basa su un set di equazioni algebriche che analizzano dal punto di vista macroscopico l'interazione tra l'edificio e l'ambiente esterno;
2. rigoroso, ossia la simulazione energetica dinamica: che tiene conto di tutti quei fenomeni transitori che influenzano le prestazioni del sistema edificio/impianti:
 - condizioni climatiche esterne;
 - indice e periodo di affollamento;
 - illuminazione naturale ed artificiale;
 - isolamento ed inerzia termica dell'involucro edilizio;
 - prestazioni degli impianti di climatizzazione in condizioni di carico parziale;
 - regolazione climatica, ecc.

Le metodologie di calcolo *semi-stazionarie* presentano molti vantaggi rispetto al metodo rigoroso, tra cui:

- numero relativamente minore di dati di input necessari;
- calcoli facilmente comprensibili;
- semplice identificazione e correlazione tra gli ingressi e le uscite.

Dai vantaggi però scaturiscono anche gli svantaggi nel momento in cui occorre descrivere il comportamento energetico di un sistema edificio-impianto complesso, oppure conoscere le richieste energetiche simili a quelle reali.

L'approccio rigoroso, non utilizzabile per delle analisi energetiche su larga scala, in quanto richiede elevati costi e tempi, ed adeguate conoscenze tecniche, prevede l'impiego di metodi di calcolo complessi, come ad esempio DOE-2, ESP-r, TRNSYS ed EnergyPlus. Questi codici di calcolo sono basati su modelli fisico matematici degli edifici, in grado di prevedere i consumi di energia termica ed elettrica annuali, mensili e giornalieri, fino a livelli orari e sub-orari, giungendo in tal modo ai costi di esercizio, a partire da una ricca serie di dati di input (condizioni climatiche esterne, descrizione fisica dell'edificio, descrizione del sistema impiantistico, dati relativi all'attività insediata o da insediare, ecc.).

L'approccio dinamico, dunque, consente di valutare in regime transitorio tutti quei fenomeni di interazione termica-energetica tra l'edificio e l'ambiente sia interno che esterno, e di investigare l'efficacia di determinate soluzioni per le quali l'approccio semi-stazionario non risulta idoneo.

Usualmente, con passo temporale sub-orario, con la metodologia dinamica è possibile conseguire i risultati riportati di seguito (si precisa che è soltanto un elenco delle principali potenzialità dei codici in regime dinamico):

1. carichi termici/frigoriferi degli edifici per la progettazione degli impianti di climatizzazione (calcolo di progetto);
2. domanda energetica per riscaldamento/raffrescamento degli edifici per il rispetto di valori prestazionali disposti dalla legislazione e/o da introdurre in protocolli di valutazione della sostenibilità energetico-ambientale (calcolo di stima dei consumi);
3. comfort termico e qualità dell'aria negli ambienti in funzione delle richieste energetiche;
4. andamento della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria in ambienti privi di controllo climatico (ambiente in free running);

5. richiesta elettrica per l'illuminazione artificiale dipendente dalle caratteristiche termofisiche e morfologiche dell'edificio, ed in particolari dallo sfruttamento degli apporti solari gratuiti e dall'efficienza dei sistemi di illuminazione (e di eventuali controlli);
6. emissioni inquinanti dovute all'esercizio degli edifici oggetto di analisi;
7. fornitura di energia termica/elettrica dovuta ad impianti alimentati da fonti rinnovabili.

Un parametro di difficile interpretazione risulta essere il comportamento dell'utenza. Da tale comportamento possono ottenersi scostamenti dei valori calcolati da quelli misurati anche del 50 %. Per cui è opportuno impostare nella simulazione il reale comportamento dell'occupante, il profilo di set-point della temperatura e l'apertura e chiusura delle finestre.

Nel momento in cui si interviene su un edificio esistente diviene di fondamentale importanza adottare pratiche di simulazione calibrata. In questo modo, la simulazione non farà più riferimento ad un edificio virtuale, ma ad uno reale, svolgendo la calibrazione su dati misurati in campo, al fine di ottenere un modello più fedele possibile a quello reale, il cui consumo energetico coincida perfettamente con quello simulato. Il modello, pertanto, sarà in grado di far prevedere i possibili benefici/aggravi derivanti da determinate azioni sul sistema edificio-impianti oggetto di studio, alla variazioni di comportamenti dell'utenza ed al cambiamento climatico.

La simulazione calibrata è incentivata nei casi in cui sono disponibili misurazioni che riguardano l'intero sistema. Molti sono gli studi riportati in letteratura nei quali si utilizzano i classici software di simulazione, come DOE-2, ESP-r, EnergyPlus, ecc. per calibrarli con i dati di performance reali. I dati energetici monitorati su scala oraria (più compatibili con il passo temporale adottato nei maggiori software di simulazione) permettono lo sviluppo di modelli calibrati più accurati. Il modello risultante sarà meno preciso al decrescere della quantità dei dati utilizzati per la calibrazione.

Le sfide principali nella simulazione calibrata riguardano l'intenso lavoro richiesto all'utente, si rendono necessarie, infatti, competenze ed abilità nella gestione pratica degli edifici e conoscenze di simulazione.

Diverse difficoltà pratiche impediscono di raggiungere una simulazione calibrata che rifletta da vicino le prestazioni dell'edificio, tra cui:

- la misurazione e l'adeguamento dei dati meteorologici per l'uso da parte dei software di simulazione (ad esempio, la conversione della radiazione solare orizzontale globale in radiazione diffusa e diretta);
- la scelta dei metodi utilizzati per calibrare il modello;
- la scelta dei metodi utilizzati per misurare i parametri di input necessari per la simulazione (cioè, la massa della costruzione, o coefficienti di infiltrazione, e i coefficienti di ombreggiatura).

Modelli “veramente” calibrati sono stati raggiunti solo in poche applicazioni, in quanto richiedono un gran numero di parametri di input, un elevato grado di competenza, ed enormi quantità di tempo di calcolo e risorse finanziarie.

Al momento un'altra difficoltà è riscontrabile nella simulazione dei sistemi impiantistici per la climatizzazione, poiché risulta ancora molto complessa e viene quindi affrontata in pochi casi, se non per studi di dettaglio.

Per ciò che concerne gli impianti di produzione energetica, al momento i codici di calcolo che consentono una simulazione energetica “globale” sono ancora marginali, difatti viene svolta con software dedicati, quali ad esempio HOMER, MERIT, PVGIS e RETScreen.

In questo lavoro di tesi di dottorato, la simulazione energetica dei sistemi edificio/impianti analizzati è stata effettuata, impiegando alcuni strumenti per l'analisi energetica dinamica Design Builder (interfaccia grafica di EnergyPlus) [66] ed EnergyPlus [67], motore di simulazione che si basa sul metodo delle funzioni di trasferimento e possiede una struttura modulare codificata in Fortran 90, evoluzione delle basi tecniche elaborate in DOE-2 [68] ed in BLAST [69] elaborati rispettivamente dal Dipartimento dell'Energia (Department of Energy, DOE) e dal Ministero della difesa (Department of Defence, DOD) degli Stati Uniti, con il contributo dell'ASHRAE (Technical Committee 4.7 Energy calculation). Per l'analisi energetica stazionaria, invece, è stato impiegato il software MC 11300 [70]. Altri software utilizzati sono ad esempio GAEA [71] per lo studio degli scambiatori terra-aria, CalcSoilSurfTemp per la valutazione delle caratteristiche termiche del terreno, PV GIS per il dimensionamento degli impianti solari fotovoltaici [72], ecc.

4.1 Metodi di calcolo dinamici

Il modello di calcolo, alla base dei software di simulazione energetica più diffusi, è fondato sulla conoscenza delle leggi termo-fisiche che regolano il sistema oggetto di analisi. Come visto in precedenza, inserendo gli opportuni dati di input e le condizioni al contorno, si ottengono i risultati richiesti.

Nelle simulazioni energetiche avanzate si impiegano vari codici *Building Energy Performance Simulations* (BEPS) e simulatori. I codici BEPS presentano un'architettura e delle fasi molto simili:

- definizione condizioni al contorno (località e caricamento dei dati climatici, impiegando i file climatici TRY [73], IWEK [74] o TMY2 [75];
- creazione modello;
- caratterizzazione superfici opache e trasparenti;
- definizione dei carichi endogeni (utenza, illuminazione ed apparecchiature elettriche);
- costruzione del sistema HVAC;

I diversi codici impiegano vari algoritmi di risoluzione per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici. Tali algoritmi si possono distinguere in:

1. **Funzioni di Trasferimento**, algoritmo in grado di legare le sollecitazioni (es. temperature, flussi termici) indotte su un sistema con la risposta del sistema stesso. In questo metodo Transfer Function Method (TFM) si utilizzano:
 - funzioni di trasferimento della parete Conduction Transfer Function (CTF) per il calcolo del flusso termico trasmesso per conduzione all'interno delle varie pareti dell'involucro;
 - funzioni di trasferimento "ambiente", Room Transfer Function (RTF) per valutare il flusso termico convettivo che deve essere fornito all'aria ambiente;
 - funzioni di trasferimento "impianto", Space Air Transfer Function (SATF) per valutare il flusso termico che deve essere fornito dall'impianto di climatizzazione;
2. **Modelli ai Volumi Finiti**;

Il metodo TFM, nel 2009, nel manuale ASHRAE Fundamentals, è stato sostituito dal metodo CTF per la sola valutazione del flusso termico trasmesso per conduzione attraverso l'involucro in regime dinamico; invece, per valutare il flusso termico da fornire all'ambiente per mantenerlo ad una temperatura prefissata è previsto l'applicazione del bilancio termico sull'aria ambiente, Air Heat Balance (AHB). Questo modello di calcolo è adottato dai software di simulazione termo-energetica più impiegati, ossia EnergyPlus e TRNSYS [76].

I metodi ai Volumi Finiti, invece, prevedono la suddivisione del sistema continuo oggetto di analisi in un insieme di porzioni discrete (volumi di controllo). Su ciascuna porzione sono svolte una serie di equazioni di bilancio (conservazione della massa e dell'energia). Con questo approccio è possibile migliorare la soluzione, incrementando il grado di discretizzazione del dominio. L'aria ambiente può considerarsi come un unico volume di controllo e, quindi, avere proprietà costanti (temperatura, umidità e concentrazioni di inquinanti, oppure può essere suddivisa in vari volumi di controllo, con il fine, ad esempio, di studiare la stratificazione termica. Questo metodo è utilizzato dal software ESP-r [76].

L'analisi numerica, dunque, rappresenta uno strumento molto utile per la valutazione di determinate soluzioni prese in considerazione sia per l'involucro edilizio, che per l'impianto di riscaldamento e climatizzazione estiva. Uno dei limiti dei codici di simulazione è quello di rappresentare l'ambiente oggetto di studio come un singolo nodo (con ipotesi di forte ventilazione a perfetta miscelazione, ossia valutazione zero-dimensionale). Pertanto, nei casi in cui il fenomeno della stratificazione termica non divenga trascurabile, questi strumenti non possono dare risultati affidabili (ad esempio edifici con elevate altezze interne, oppure strategie di diffusione dell'aria prevedono l'utilizzo di una ventilazione a dislocamento, che determina una mancanza di uniformità nell'ambiente).

In merito a ciò uno dei principali sviluppatori di Energy Plus, Drury B. Crawley, ha affermato che *“anche se questo non riflette la realtà fisica, l'unica alternativa attuale è la fluidodinamica computazionale , cioè una simulazione del movimento del fluido (in questo caso aria) complessa e intensiva dal punto di vista computazionale”*.

Gli strumenti BEPS implementano i bilanci energetici mediante equazioni matematiche, che si suddividono in:

- Eq. 4.1 che contiene la risoluzione di algoritmi connessi alle superfici delimitanti l'edificio (pareti, copertura, finestre, ecc.);
- Eq. 4.2 che contiene la risoluzione di algoritmi connessi alle condizioni dell'aria interna [77].

$$q_{i,cond} + q_{i,s-rad} = \sum_{k=1}^N q_{ik,rad} + q_{i,conv} \quad (4.1)$$

con:

- $q_{i,cond}$: flusso termico conduttivo che interessa la j-esima superficie;
- $q_{j,s-rad}$: flusso termico tra la j-esima superficie ed una fonte di calore interna o solare;
- $q_{jk,rad}$: flusso termico radiativo tra la superficie j ed una k;
- $q_{j,conv}$: flusso termico convettivo sulla j-esima superficie.

$$\sum_{i=1}^N q_{i,conv} \cdot A_i + Q_{other} - Q_{extract} = (\rho \cdot V_{room} \cdot c_p \cdot \Delta T_{room}) / \Delta t \quad (4.2)$$

in cui:

- $\sum_{j=1}^N q_{j,conv}$: scambio termico convettivo tra la j-esima, di area A_j , e l'aria interna;
- $\frac{\rho V_{room} c_p \Delta T_{room}}{\Delta t}$: scambio termico relativo all'aria indoor;
- ρ : densità dell'aria;
- c_p : calore specifico per unità di massa;
- Q_{endo} : guadagni termici dovuti alla presenza di persone, attrezzature, luci artificiali, ecc.;
- Q : carico termico totale che deve essere bilanciato;
- ΔT_{room} : differenza di temperatura rispetto all'aria interna;
- Δt : intervallo di tempo.

L'Eq. 4.1 consente di calcolare la temperatura delle superfici interne e di quantificare gli scambi convettivi di energia che coinvolgono quest'ultime, mediante i quali è possibile determinare, con l'ausilio delle Eq. 4.3 e 4.4, le temperature medie dell'aria interna ed il carico termico totale che deve essere bilanciato.

$$q_{ik,rad} = h_{ik,rad} \cdot (T_i - T_k) \quad (4.3)$$

$$q_{i,conv} = h_{i,conv} \cdot (T_i - T_{i,air}) \quad (4.4)$$

dove:

- * $h_{i,rad}$: coefficiente linearizzato di scambio termico radiante;
- * T_i : temperatura della superficie interna i;
- * T_k : temperatura della superficie interna k;
- * $T_{i,aria}$: temperatura dell'aria interna vicino alla superficie k;
- * $h_{i,conv}$: coefficiente di scambio termico convettivo.

Usualmente, il coefficiente $h_{i,conv}$ non è noto ed è stimato attraverso equazioni empiriche o assunto come una costante.

Per questo, a volte, si svolgono analisi accoppiando due strumenti: quelli della simulazioni dinamica energetica dell'edificio e quelli per l'analisi fluidodinamica computazionale (CFD).

4.2 Inerzia termica degli edifici

Il comportamento termico ed energetico di un edificio è diretta funzione dei materiali di cui è costituito, materiali che trasmettono in modo e quantità differente l'energia termica. Quest'ultima è accumulata in relazione all'inerzia termica dei componenti, allo spessore dei diversi materiali ed alle caratteristiche cromatiche.

In natura esistono tre meccanismi di trasmissione del calore: conduzione, convezione ed irraggiamento.

Considerando lo scambio di energia termica tra l'ambiente interno e quello esterno, esso avviene per meccanismi combinati di trasmissione del calore, nel verso delle temperature decrescenti, ortogonalmente alla parete stessa; difatti, la potenza termica viene trasferita:

- dall'interno dell'ambiente alla superficie interna della parete mediante irraggiamento e convezione;
- dalla superficie interna a quella esterna con l'ausilio della conduzione termica;
- dalla superficie esterna della parete all'ambiente esterno attraverso la convezione e l'irraggiamento.

I meccanismi convettivi sono attribuiti ai moti dell'aria che lambisce la superficie interna ed esterna della parete, ed interessano una zona limitata di aria a ridosso della superficie, comunemente denominata "strato liminare", rispettivamente, interno od esterno.

Pertanto, la temperatura sulla faccia interna di una parete è il risultato del bilancio tra gli scambi di calore presenti su di essa, ovvero: convezione con l'aria interna, irraggiamento con le

altre superfici interne (altre pareti, persone, oggetti, sorgenti di calore) e conduzione all'interno degli strati della parete stessa. Allo stesso modo, la temperatura sulla faccia esterna di una parete è il risultato del bilancio tra gli scambi di calore per convezione con l'aria esterna, per irraggiamento con il sole e le superfici esterne (suolo, cielo, edifici, oggetti) e per conduzione nella parete. La natura dei materiali impiegati in edilizia determina che nella velocità di trasferimento dell'energia termica governi in particolare modo la conduzione.

L'inerzia termica, correlata al fenomeno della conduzione, viene molto sfruttata, anche grazie alle recenti leggi che l'hanno introdotta come parametro fondamentale da tenere presente in sede progettuale, per mitigare le oscillazioni di temperatura nell'ambiente e sfasare i picchi di calore esterno dalle ore di massima insolazione alle ore serali quando la ventilazione può essere d'aiuto a smaltire i carichi termici interni, riducendo la richiesta di potenza per la climatizzazione estiva.

Dal punto di vista legislativo, nell'arco temporale 2009-2010, era previsto di valutare in fase di progettazione che i vari componenti edilizi dell'involucro edilizio garantissero valori di sfasamento termico compresi tra le 8 e 10 ore.

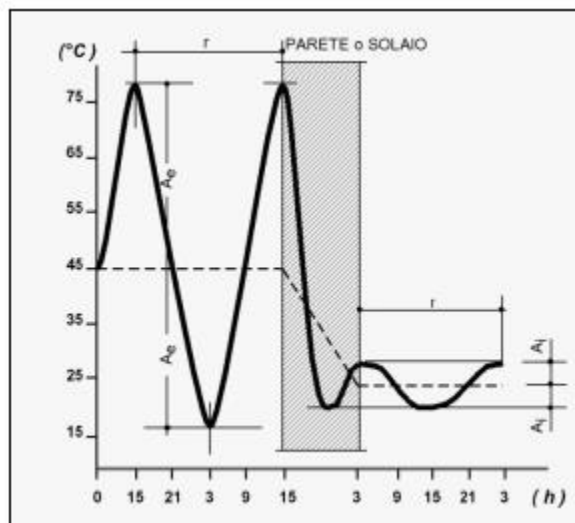


Fig. 4.2.1: Sfasamento ed attenuazione dell'onda termica

La normativa UNI EN ISO 13786:2008 [78] contiene una procedura per il calcolo del fattore di decremento, del suo ritardo e delle capacità termiche riferite alle facce della parete.

Viene ipotizzato che la temperatura ed i flussi termici siano delle sinusoidi le quali, nel momento in cui attraversano la parete, subiscono un'attenuazione ed uno sfasamento (Fig. 4.2.1).

Il fattore di decremento è definito come il rapporto tra il modulo della trasmittanza termica periodica (Y_{IE}) e la trasmittanza in condizioni stazionarie (U) della parete.

La Y_{IE} è una quantità complessa definita come il rapporto tra l'ampiezza complessa della densità di flusso termico entrante nella faccia esterna e l'ampiezza complessa della temperatura dell'aria interna. Il ritardo del fattore di decremento è calcolato come il rapporto tra l'argomento della trasmittanza termica periodica e la pulsazione della funzione sinusoidale.

Viene evidenziato nella norma che il *periodo delle funzioni sinusoidali* influenza i risultati, ma non viene indicato alcun valore di esso da adottarsi per i calcoli; vengono solo indicati come periodi di tempi, definiti pratici, quelli di un'ora, un giorno, una settimana ed un anno.

La determinazione dei parametri di trasmissione termica dei componenti opachi è affrontato con approccio analogo nell'Appendice A della norma UNI 10375:2011 [79].

Le norme UNI impiegano un approccio semplificato. Infatti, se da un lato si può accettare che i parametri ambientali esterni abbiano un andamento giornaliero quasi periodico, con durata di 24 ore, ben più difficile è sostenere che una semplice sinusoide raffiguri il loro andamento temporale.

A livello Nazionale, in un non lontano passato i progettisti (edili e degli impianti) avevano a disposizione metodi di calcolo in regime stazionario riferiti alla convenzionale “temperatura esterna di progetto” per il riscaldamento ed al profilo giornaliero del carico termico nel giorno estivo più critico per il condizionamento dell'aria (si utilizzava il metodo Carrier). In tal modo, essi non avevano a disposizione alcuno strumento di calcolo utile per simulare il comportamento degli impianti al di fuori delle condizioni di progetto, cioè in condizioni di carico termico di picco (misurato in unità di potenza Watt).

Un'altra incognita diveniva, quindi, il fabbisogno termo-energetico dell'edificio. In regime invernale, la stima veniva effettuata con il metodo dei Gradi Giorno, tenendo conto degli apporti gratuiti (in modo molto grossolano) e dell'inerzia termica dell'involucro edilizio in caso di funzionamento intermittente dell'impianto termico; invece, in regime estivo, il fabbisogno energetico era del tutto ignorato e non esistevano strumenti per valutarlo [76].

Con l'emanazione della L. 10/91, si iniziò ad imporre ai progettisti il conseguimento di una maggiore consapevolezza dell'importanza dello studio del sistema edificio-impianti, almeno per ciò che riguardava il riscaldamento, e divenne necessario garantire che il fabbisogno termo-energetico convenzionale dell'edificio non superasse determinati valori limite in relazione alla zona climatica ed al fattore di forma dell'edificio.

La norma UNI 10344 [80], poi seguita dalle norme UNI 10379 [81] e UNI EN 832 [82], fu la prima a fornire un vero e proprio metodo di calcolo per la quantità di energia richiesta per il riscaldamento, introducendo la valutazione analitica degli **apporti termici** gratuiti (sia solari che endogeni) e venne definito un fabbisogno energetico normalizzato (FEN). In tale periodo si ebbe il passaggio dal concetto di “progettazione termotecnica” al concetto di “progettazione energetica”.

Con il D.Lgs 192 del 2005 e le sue successive integrazioni e modificazioni, si confermò il riferimento cogente al fabbisogno energetico dell'edificio piuttosto che alla potenza installata, e vennero definiti alcuni indici di prestazione energetica EP, normalizzati alla superficie di calpestio (settore residenziale) oppure al volume riscaldato (settore non residenziale), riferiti non soltanto alla climatizzazione invernale, ma anche alla climatizzazione estiva, alla produzione di acqua calda sanitaria ed all'illuminazione artificiale.

A livello normativo le specifiche UNI TS 11300, che definiscono le modalità per l'applicazione della norma UNI EN 13790 del 2008, indirizzano i progettisti a valutare il fabbisogno energetico dell'edificio, sia nel periodo invernale che in quello estivo, in condizioni di progetto (design rating), in condizioni standard (asset rating molto utile per la certificazione energetica) e di esercizio (tailored rating).

Il metodo di calcolo proposto è basato sull'ipotesi di **regime “quasi stazionario”** e considera **valori medi mensili** delle variabili climatiche. Tuttavia anche i valori medi mensili non consentono di delineare con sufficiente grado di dettaglio il comportamento nel tempo del sistema edificio-impianto come dimostrato in [76].

Con il passare degli anni, soprattutto dopo l'avvento selvaggio dei sistemi multi-split che richiedono l'installazione di unità esterne (anche nei centri storici), la legislazione ha iniziato a focalizzarsi con più dettaglio anche all'aspetto energetico estivo [16].

Il comportamento estivo degli edifici è principalmente non-stazionario e quindi l'affidabilità dei risultati dei modelli di calcolo semplificati semi-stazionari è relativamente bassa.

Un altro punto importante è rappresentato dal fatto che la richiesta energetica estiva interagisce dinamicamente con le abitudini e con le modalità di gestione del sistema edificio-impianto da parte degli occupanti, ma anche con gli eventi climatici. Dunque, dal momento che le simulazioni energetiche dinamiche orarie riproducono tutte le interazioni (molto prossime a quelle reali) tra ambiente, strutture, occupanti e condizioni climatiche interne, esse hanno la potenzialità di fornire informazioni rilevanti ed affidabili sul comportamento dell'edificio in regime estivo.

A livello nazionale, la legislazione si sta muovendo, seppur lentamente, verso la promozione di soluzioni tecniche atte a ridurre la domanda energetica estiva. Inizialmente, con un approccio ancora marginale, la riduzione del fabbisogno energetico estivo era demandata all'utilizzo di schermature solari ed all'introduzione di un valore minimo di massa superficiale per i componenti opachi dell'involucro, o, in alternativa, di un valore limite per lo sfasamento e l'attenuazione. Le ultime direttive sul risparmio energetico (DPR 59/09, oggi abrogato ed i decreti di attuazione della L. 90/2015) hanno poi introdotto un ulteriore parametro di verifica del comportamento estivo dell'involucro, ovvero la trasmittanza termica periodica, Y_{IE} .

Questo aspetto verrà descritto più in dettaglio nei paragrafi successivi.

4.3 Algoritmi di simulazione energetica dinamica: EnergyPlus

Uno dei codici Building Energy Performance Simulation (BEPS) maggiormente utilizzato è EnergyPlus.

EnergyPlus è sorto come risposta alle lacune dei codici BLAST e DOE-2, che avevano centinaia di subroutines difficili da gestire nell'implementazione di nuovi algoritmi e non consentivano la gestione corretta dei feedback da parte del sistema HVAC, né consentivano di seguire il progresso tecnologico del settore impiantistico.

EnergyPlus è il simulatore di calcolo implementato, ad esempio, nel software Design Builder (per i moduli CTF e CFD). Il software simula:

1. lo scambio termico attraverso le pareti in regime dinamico attraverso il metodo CTF;
2. i carichi termici secondo il metodo AHB;
3. condizioni di comfort termico;
4. il bilancio idrico nell'ambiente e dei vari componenti edilizi;
5. energia richiesta dal sistema HVAC.

Nel codice impiegato, sia i dati di input che di output sono sottoforma di dati ASCII.

I dati di input sono inseriti mediante un'interfaccia utente, IDF editor; mentre, quelli di output sono forniti in formato .csv (comma separate value).

Tutti i risultati si ottengono per mezzo di un algoritmo di risoluzione, impiegando un'analisi integrata e simultanea dell'edificio e degli impianti.

Il codice presenta un sistema complesso di moduli e di risolutori numerici per calcolare l'energia necessaria per il riscaldamento, la climatizzazione estiva, la ventilazione e l'illuminazione artificiale prodotti con risorse tradizionali, ma anche rinnovabili.

La struttura, i moduli e la gestione sono raffigurate nella Fig. 4.3.1.

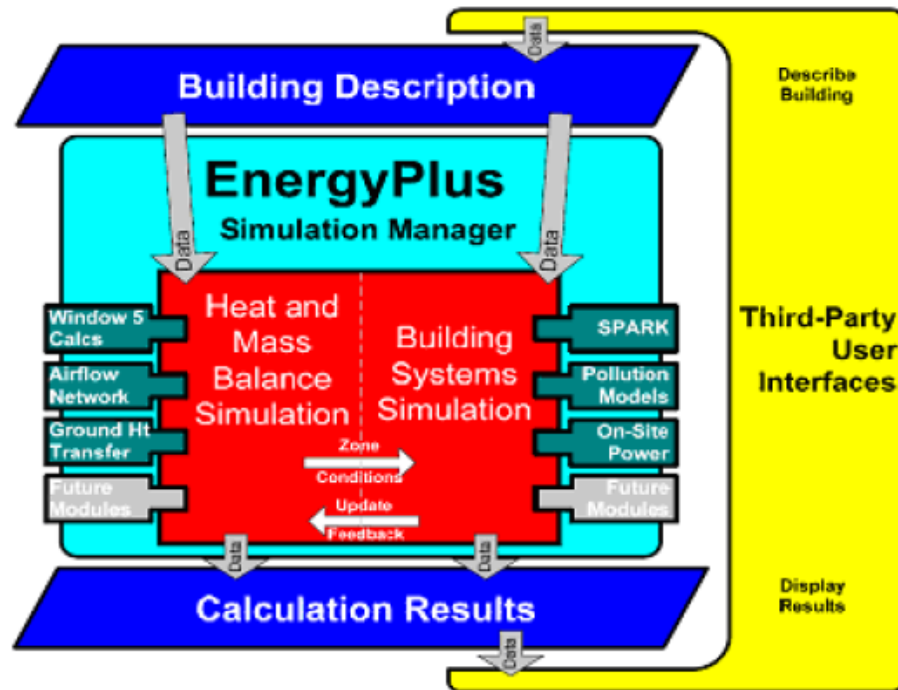


Fig. 4.3.1: Struttura e moduli di EnergyPlus [83]

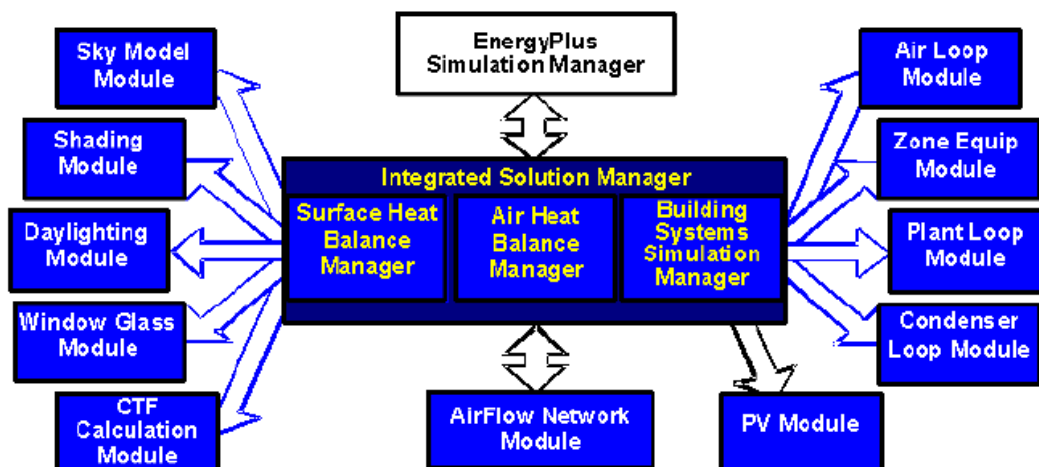


Fig. 4.3.2: Architettura di EnergyPlus [83]

Tra i vari moduli, di cui si costituisce il codice, avviene un continuo scambio di informazioni in parallelo. In tal modo i carichi calcolati sono inviati al modulo di simulazione "edificio" con lo stesso passo temporale di simulazione.

I tre moduli principali, che interagiscono con altri secondari, sono:

1. *Surface Heat Balance Manager* per risolvere il bilancio termico in corrispondenza di ogni parete;
2. *Air Heat Balance Manager* per il bilancio dell'ambiente con la simulazione contemporanea degli scambi termici radianti e convettivi;
3. *Building Simulation Manager* che svolge la simulazione degli impianti *Systems*.

Tali moduli si trovano all'interno dell'*Integrated Solution Manager* (Fig. 4.3.2), che gestisce il tutto in modo simultaneo e non in cascata. Per questo motivo, si necessita di un livello di definizione alto delle condizioni al contorno per poter ottenere risultati affidabili.

Il *Simulation Manager* coordina tutti i moduli, come una sorta di supervisore, stabilendo e controllando le interazioni simultanee. Il suo fine principale è quello di guidare lo scambio di dati tra il risolutore del bilancio termico ed i vari sotto-moduli del sistema impianto, come: caldaie, pompe, refrigeratori e gli ausiliari.

Per l'interazione tra i diversi moduli sono richiesti due time-step:

- definito dall'utente: per analizzare l'interazione tra zone termiche e l'ambiente esterno;
- non direttamente modificabile dall'utente: variabile per l'analisi dei sistemi di climatizzazione (System time-step).

Tra la domanda energetica dell'edificio e l'offerta dell'impianto vengono effettuate diverse iterazioni:

1. iterazione n. 1: stima del carico termico ambiente (assunto come potenza richiesta al sistema VAC), fissando la temperatura interna di set-point;
2. iterazione n. 2: simulazione del comportamento dell'impianto di climatizzazione (stima dell'effettiva potenza termica in grado di fornire in quell'istante temporale). Questa potenza determina la temperatura della zona termica, avendo approssimato la derivata temporale della temperatura dell'aria, nel termine che rappresenta la variazione di energia interna del sistema, attraverso una differenza finita del terzo ordine. Procedura nota come *predictor/corrector method*.

I dati climatici sono introdotti, considerando:

1. specifici giorni di progetto definiti dall'utente (per il dimensionamento);
2. file climatici, file.epw (EnergyPlus Weather data file), per le simulazioni energetiche riguardanti l'esercizio dell'edificio. I file climatici contengono dati relativi a temperatura, umidità, irradianza diretta normale avendo assunto un modello di cielo anisotropo. Infatti, una delle caratteristiche principali di EnergyPlus, rispetto ad altri codici, è l'attenzione alla simulazione della luce diurna, che viene fatta sulla base del modello *split-flux interreflection* e su un modello di cielo anisotropo. Sono contenuti dati che riguardano la posizione del sole e la copertura delle nubi. Mediante un'apposita sezione specifica di calcolo (modulo di luce diurna) è possibile valutare: illuminazione naturale degli ambienti, fenomeni di abbagliamento attraverso componenti trasparenti, integrazione con illuminazione artificiale e le richieste di energia ad essa collegate ed i relativi guadagni termici.

Nel codice è possibile trovare anche un modulo basato su metodi *radiosity inter-reflection*, che consente di simulare gli effetti radiativi in caso componenti trasparenti complessi, caratterizzati da fenomeni di trasmissione multi direzionale.

L'Heat and Mass Balance Simulation controlla la simulazione delle varie zone termiche.

L'air heat balance è basato sulle seguenti assunzioni:

- temperatura dell'aria ambiente uniforme (perfetta miscelazione, modello zero-dimensionale);
- temperatura uniforme di ciascuna superficie;
- irraggiamento uniforme ad alta e a bassa lunghezza d'onda;
- superfici uniformemente diffondenti;
- trasmissione del calore per conduzione monodimensionale.

Nella Fig. 4.3.2 si nota che il modulo Heat and mass Balance Simulaton funziona mediante vari strumenti di calcolo:

- strumento relativo al calcolo dei flussi d'aria, infiltrazioni, ventilazione e contaminanti;
- strumenti di calcolo inerenti ai sistemi finestrati ed al modulo del cielo anisotropo;
- strumento per valutare la luce diurna (anche attraverso sistemi complessi, ad es. vetri elettrocromici) illuminamento interno, abbagliamento indotto dalle superfici trasparenti, sistemi di controllo dell'abbagliamento e dell'illuminazione artificiale;
- strumento per il calcolo del profilo di temperatura ed il suo potenziamento per il pre-riscaldamento e pre-raffrescamento.

Il bilancio di massa e di energia si basa su una procedura evoluta, la I-BLAST, che fornisce l'integrazione delle simulazioni del sistema edificio/impianti.

Il modello di calcolo dell'edificio viene suddiviso in zone termiche.

Su ciascuna parete sono svolti bilanci sui nodi superficiali esterni (bilancio termico superficie esterna) e sui nodi interni (bilancio termico superficie interna) e tra i nodi esterni ed interni viene valutato il flusso termico per conduzione (conduzione attraverso la parete).

Nel caso del nodo esterno, il bilancio assume nel calcolo anche la radiazione solare incidente assorbita, la convezione con l'aria esterna, la radiazione ad onda lunga, la conduzione in parete; invece, nel nodo interno, il bilancio considera la radiazione a bassa lunghezza d'onda, la radiazione solare trasmessa negli spazi confinati attraverso i componenti trasparenti e distribuita sulle varie superfici, la convezione con l'aria interna, la radiazione ad onda lunga emessa dalle altre superfici dell'ambiente e la conduzione attraverso la parete.

Il modulo "bilancio energetico" valuta lo scambio tra le superfici esterne e quelle interne dell'involucro edilizio, mediante gli algoritmi: CTF o CFD, prendendo in considerazione tutti i contributi convettivi, conduttivi e radiativi. I flussi termici scambiati, tra l'ambiente esterno e quello interno, attraverso l'edificio vengono valutati con una funzione di trasferimento, che lega la sollecitazione sul sistema alla risposta del sistema stesso.

La funzione di trasferimento usa dei coefficienti numerici lineari, denominati response factor, raggruppati in quattro serie, che moltiplicano la temperatura superficiale interna/esterna (all'istante considerato e in un certo numero di istanti precedenti) ed il flusso termico sulla faccia analizzata (ad un certo numero di istanti precedenti). Si riporta un esempio di CTF in merito ai flussi termici sulle superfici interne ed esterna di un componente edilizio.

I coefficienti sono i fattori di risposta:

- Z detti inside CTF coefficients;
- Y detti cross CTF coefficients;
- Φ chiamati flux CTF coefficients;

- X chiamati outside CTF coefficients (per la determinazione del flusso termico in corrispondenza del nodo esterno della parete e moltiplicano i valori di temperatura della faccia esterna della parete).

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (4.5)$$

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (4.6)$$

Nelle equazioni 4.5 e 4.6 sono presenti i seguenti termini:

- $q''_{ki}(t)$: flusso sulla superficie interna;
- $q''_{ko}(t)$: flusso sulla superficie esterna;
- T_i : temperatura della superficie interna;
- T_o : temperatura della superficie esterna;
- t : intervallo di tempo corrente;
- Z : coefficiente CTF all'interno;
- X : coefficiente CTF all'esterno;
- Y : coefficiente CTF trasversale;
- Φ : coefficiente CTF di flusso.

Come detto in precedenza, il codice EnergyPlus utilizza una procedura, già impiegata nel software I-BAST, denominata space method.

Ciò che avviene negli strati interni della parete non si conosce, in quanto sono noti solo temperature e flussi sulle superfici.

I flussi di energia sono correlati linearmente con le temperature e lo scambio termico mediante le funzioni di trasferimento per conduzione, in modo tale da ottenere i fenomeni di accumulo termico.

EnergyPlus adotta la procedura denominata state space method già sviluppata dal software I-BLAST. È evidente che poiché sono noti soltanto la temperatura ed il flusso sulle superfici, il metodo non fornisce informazioni su quello che accade sugli strati interni della parete. Tale metodo diventa instabile quando il numero di bilanci nell'arco di ogni ora di minuisce. Devono essere garantiti almeno 10-15 bilanci per ogni ora.

EnergyPlus può simulare anche sistemi di riscaldamento e raffrescamento radianti, modellando un circuito di acqua calda/refrigerata annegato nei componenti edilizi.

Ancora con EnergyPlus è possibile adottare alcuni modelli di distribuzione dell'aria in ambiente alternativi, come la ventilazione a dislocamento o la ventilazione dal basso, UFAD (Under Floor Air Distribution).

Il modulo del bilancio di massa e di energia trasmette i dati di output di ogni step di simulazione al Building system simulation manager.

Il modulo struttura controlla le simulazioni del sistema HVAC, di tutto il sistema elettrico, dei componenti e dispositivi, fino a giungere al controllo del microclima indoor.

I dati, successivamente, sono ritrasmessi al modulo del bilancio di massa e di energia, in modo che gli effetti degli impianti possano essere calcolati nel nuovo bilancio della zona termica. Ovvero, è un metodo di simulazione non-sequenziale, in modo da avere una simulazione pienamente integrata dei carichi, dei sistemi e dispositivi attivi.

Nel Building System Simulation Manager (Fig. 4.3.3), l'impianto è scomposto in tre parti:

1. l'air loop per modellare il circuito aeraulico. In particolare, consente di simulare la climatizzazione ed il riscaldamento dell'aria, l'impiego di recuperatori di calore e gli economizzatori per il free-cooling. Inoltre, consente di considerare anche regolatori per la miscelazione, diverse unità locali, come ventilconvettori, bocchette d'aria, ecc.;
2. il plant loop per modellare la rete idronica. Nel circuito dell'acqua calda e refrigerata, la risoluzione è iterativa; ovvero, tutti i componenti sono simulati in contemporaneo; quindi, le equazioni di controllo sono aggiornate mediante esplicite differenze finite. La procedura continua fino al momento in cui non si giunge alla convergenza dei risultati;
3. il condenser loop per simulare il circuito di condensazione.

Usualmente l'efficienza dei sistemi di generazione (in condizioni nominali) viene inserita dall'utente, mentre le prestazioni nelle altre condizioni operative sono determinate attraverso il Part Load Ratio (PLR), ossia il rapporto tra la potenza richiesta a carico parziale e la potenza nominale. Le correlazioni possono essere funzioni polinomiali lineari, quadratiche, cubiche, biquadratiche, bicubiche, o triquadratiche o funzioni esponenziali.

Per i gruppi frigoriferi sono necessari i valori di efficienza, a carico totale, con le curve della variazione della potenza frigorifera in funzione delle temperature e delle variazioni dell'efficienza rispetto al carico parziale. Nel caso delle sonde geotermiche, la procedura prevede l'impiego del metodo del fattore di risposta del terreno alle variazioni di carico, sia di lunga che di breve durata [128].

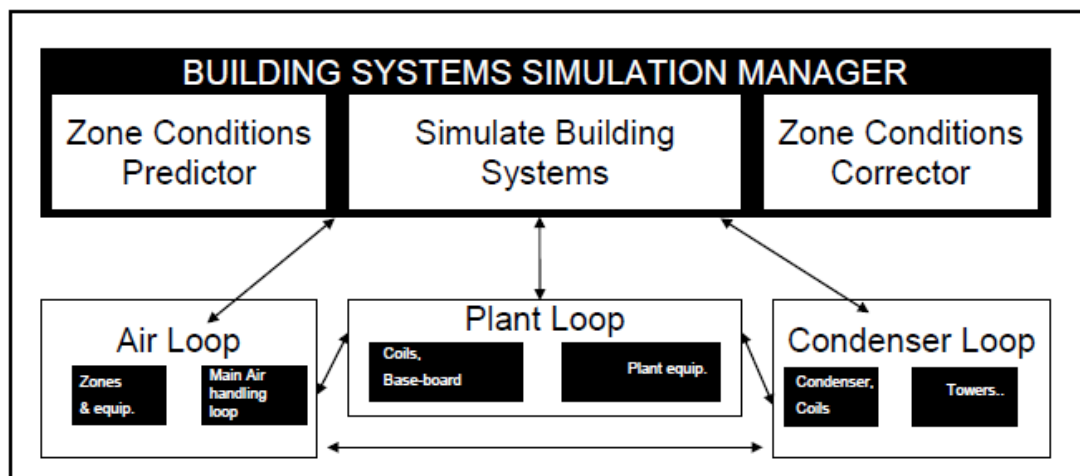


Fig. 4.3.3: Logica operativa di EnergyPlus [83]

Capitolo 5

Attività di ricerca

5.1 Tematiche analizzate e metodologia utilizzata

Il principale scopo dell'attività di ricerca è la valutazione di strategie passive ed attive finalizzate alla minimizzazione dei consumi di energia primaria, alla riduzione dei costi di gestione e dell'impatto ambientale, ed al miglioramento delle condizioni di comfort termico all'interno degli ambienti, sia con riferimento ad edifici di nuova costruzione che, soprattutto, alla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente. Ciò è stato effettuato mediante l'ausilio di codici di simulazione energetica, soprattutto in regime dinamico, che sono stati descritti nel capitolo 4.

Un altro scopo della tesi è stata l'estensione dell'attività di ricerca ad edifici di nuova costruzione e ad edifici rappresentativi del parco edilizio esistente sia per tipologia costruttiva che impiantistica, con il fine di valutare le potenzialità e le criticità derivanti dall'applicazione a scala urbana di determinate azioni di ottimizzazione dell'efficienza energetica (Fig. 5.1.1).

L'attività di tesi è stata suddivisa in macro-aree. Le tematiche approfondite sono le seguenti (Fig. 5.1.2):

- finiture superficiali innovative dell'involucro edilizio (par. 5.2);
- livello ottimale di isolamento termico (par. 5.3);
- scambiatori aria-aria e terra-aria inseriti in impianti di climatizzazione (par. 5.4);
- nZEBs (nearly Zero Energy Buildings, par. 5.5).

L'attuale legislazione [16], come descritto in precedenza, richiede una progettazione integrata del sistema edificio-impianto. Pertanto, l'attività di ricerca ha previsto i seguenti step:

- minimizzazione della richiesta energetica dell'involucro edilizio, che rappresenta l'interfaccia di scambio termico tra l'ambiente esterno e quello interno;
- impiego di impianti (in particolari di climatizzazione) ad alta efficienza energetica;
- sfruttamento delle risorse energetiche rinnovabili.

L'utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili (FER) consente di conseguire 3 "tipologie energetiche" di edificio:

- nZEB, quando la domanda energetica è superiore, seppur di poco, alla copertura da FER;
- NZEB, quando la domanda energetica eguaglia la produzione di energia da FER;
- Plus Energy Building, quando la richiesta di energia è inferiore alla produzione energetica da FER.

A tale proposito, occorre menzionare (come descritto precedentemente) che nell'immediato futuro, tutti gli edifici di nuova costruzione, a partire dal 1° gennaio 2021, dovranno essere nZEB,

ossia “edifici ad altissima efficienza energetica, il cui fabbisogno basso o quasi nullo deve essere coperto in misura significativa da fonti energetiche rinnovabili” [16].

STRUTTURA DELLA RICERCA (1/2)

PRINCIPALI OBIETTIVI

- a) L'attività di ricerca è stata incentrata sullo studio di **strategie passive ed attive** finalizzate alla **minimizzazione dei consumi di energia primaria**, alla **riduzione, quindi, dei costi di gestione e dell'impatto ambientale**, ed al **miglioramento delle condizioni di comfort termico all'interno degli ambienti**, sia con riferimento ad **edifici di nuova costruzione** che soprattutto alla **riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente**.

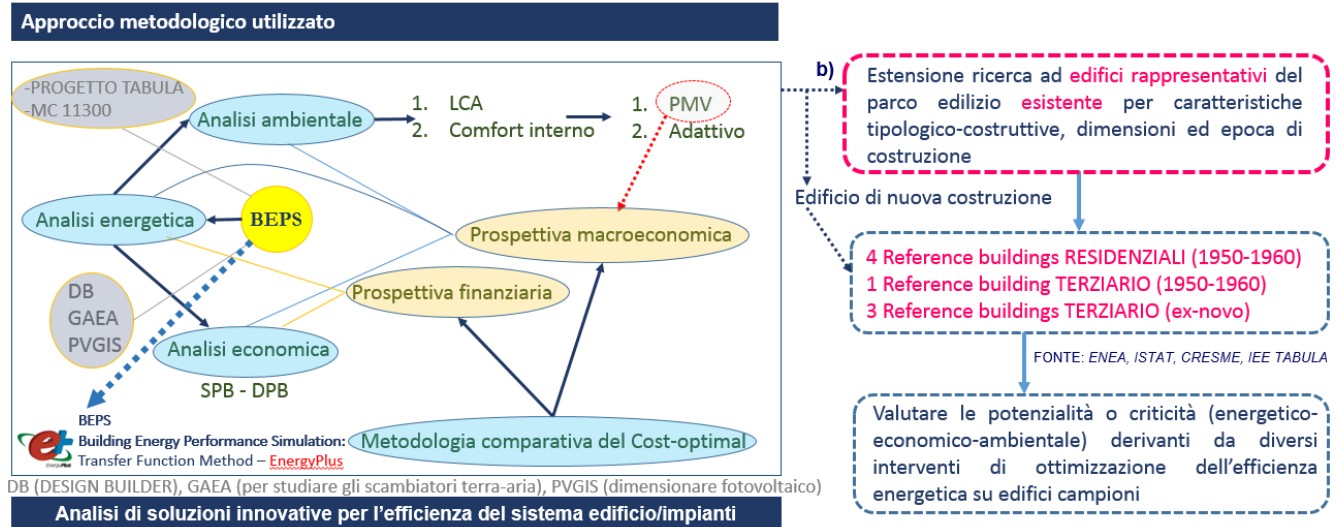


Fig. 5.1.1: Principali obiettivi e strumenti utilizzati

STRUTTURA DELLA RICERCA (2/2)

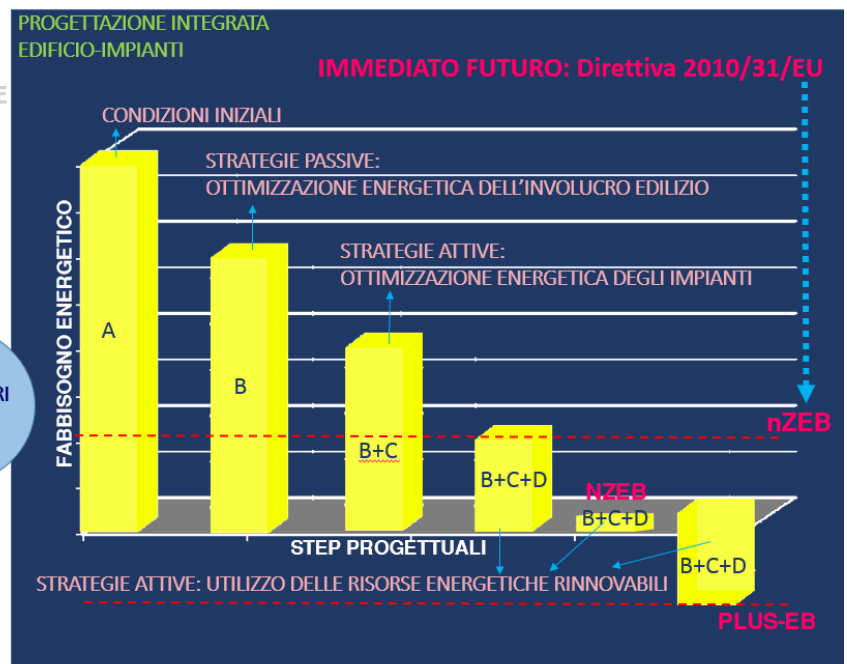


Fig. 5.1.2: Tematiche analizzate e fasi considerate

L'attività di ricerca ha riguardato la determinazione di interventi di riqualificazione energetica di edifici esistenti, con riferimento alla realtà italiana ed a quella di altre città europee.

Il principale fine del seguente lavoro è stato duplice:

1. valutare le potenzialità o le criticità derivanti dall'applicazione di diverse azioni di ottimizzazione dell'efficienza energetica del sistema edificio-impianti;
2. estendere l'attività di ricerca ad edifici di riferimento rappresentativi del patrimonio edilizio italiano ed europeo, sia in termini di tipologia costruttiva edilizia che impiantistica.

5.2 Ottimizzazione dell'involucro edilizio mediante finiture superficiali innovative

5.2.1 Introduzione

La prima attività di ricerca che si presenta in questo lavoro di tesi consiste nell'applicazione di alcune tecniche di controllo climatico passivo ad edifici esistenti, al fine di ottenere rilevanti risparmi energetici mediante l'uso di finiture superficiali innovative. E' stata valutata la corrispondente influenza sulla richiesta energetica per il riscaldamento ed il raffrescamento, sui costi di gestione energetica, sulle emissioni nocive in atmosfera, considerando gli impianti tipici dell'edilizia residenziale (radiatori e split-systems).

La prima attività di ricerca deriva:

- dall'individuazione di alcune problematiche riscontrate nel settore edilizio;
- dalla direzione intrapresa dalla legislazione nazionale in materia di recupero dei sottotetti (dal 1996 varie Regioni italiane hanno legiferato in materia di recupero dei sottotetti), sia per ridurre il consumo di territorio che per minimizzare le richieste energetiche;
- dalla carenza derivante dalla letteratura scientifica (con riferimento ad esempio allo studio dell'incidenza di finiture superficiali innovative su base annuale e non soltanto su base stagionale). Lo studio su base annuale ha consentito di valutare sia i benefici che gli aggravii energetici derivanti dagli interventi proposti.

In particolare, partendo da dati statistici, è stato individuato il mercato potenziale italiano per la riqualificazione energetica edilizia ed è stato fissato, quindi, l'oggetto su cui svolgere la prima attività, ovvero gli attici, che presentano pessime prestazioni energetico-ambientali.

I sottotetti/attici sono delle unità ambientali adibite originariamente a deposito, oppure a spazio cuscinetto e, quindi, sono sorti con funzioni differenti da quelle abitative e si contraddistinguono per molteplici criticità, quali: altezze ridotte, superficie abitabile correlata all'altezza, scarso isolamento termico, bassa inerzia termica e rivestimento in tegole di laterizio avente un basso fattore di riflessione solare (minore di 0.3-0.4).

Come detto, diverse regioni italiane (come ad esempio la Regione Toscana) hanno legiferato in materia di recupero dei sottotetti. Nel caso di interventi di ristrutturazione edilizia, per trasformare un sottotetto non abitabile in abitabile sono previsti i seguenti requisiti minimi:

1. altezza media dei locali pari a 2.30 m per gli spazi ad uso abitazione, riducibile a 2.10 m per i locali accessori o quelli di servizio;
2. altezze ridotte a 2.10 m per gli spazi ad uso abitazione e 2.00 m per gli spazi accessori o di servizio (bagni, corridoi, ripostigli, angolo cottura, ecc.) nei comuni montani;

3. altezza della parete più bassa non inferiore a 1.50 m per gli spazi ad uso abitazione e a 1,30 m per gli spazi accessori (riducibile rispettivamente a 1,30 e 1,10 m nei territori montani).
4. per rispettare i parametri di igiene e salubrità di un edificio abitabile, l'apertura di finestre e di abbaini deve assicurare i rapporti aero-illuminanti pari a 1/16 della superficie pavimentata.

Per tale motivo, risulta utile lo studio di particolari finiture superficiali, a basso costo e compatibili dal punto di vista architettonico che, con spessori ridotti, consentono di ridurre la domanda di energia per il riscaldamento/raffrescamento degli attici esistenti.

Pertanto, una volta definite le criticità, sono stati individuati alcuni interventi innovativi, che consentono di migliorare le prestazioni energetiche degli attici, perseguendo gli obiettivi di semplicità di applicazione, economicità, riduzione degli spessori dei materiali isolanti e compatibilità dal punto di vista architettonico.

Per questi edifici è stata valutata l'incidenza di alcune finiture superficiali interne ed esterne sulla richiesta energetica stagionale ed annuale relativa alla climatizzazione invernale/estiva, sui costi energetici di gestione, sull'impatto ambientale e sul miglioramento del comfort ambientale.

Sulla base di dati di letteratura, di indagini statistiche e dei risultati del progetto di ricerca europeo IEE TABULA [53], sono stati definiti degli edifici di riferimento del settore residenziale (uno per l'Italia, uno per la Spagna, uno per Francia-Germania-Regno Unito ed uno per la Svezia), per il periodo temporale di costruzione 1950-1960, al fine di estendere la ricerca ad edifici rappresentativi del parco edilizio esistente per funzionalità, caratteristiche tipologico - costruttive e condizioni climatiche.

È stato approfondito il tema inerente le finiture superficiali innovative, impiegando alcuni rivestimenti ad alto fattore di riflessione solare per le superfici esterne ed integrando le nanotecnologie nei comuni materiali edili, per ottenere finiture superficiali a bassa emissività nel campo dell'infrarosso, da applicare sulle superfici interne dell'involucro edilizio. Lo studio è stato effettuato sia per edifici non isolati che isolati.

L'attività di ricerca, inoltre, ha portato a determinare un parametro nuovo, denominato "Coating Factor", in grado di descrivere sinteticamente il clima della località considerata e di supportare i progettisti edili nella scelta delle finiture superficiali ottimali dal punto di vista energetico. Il fattore è stato suddiviso in "outside coating factor" (OCF) ed in "inside coating factor" (ICF), in modo da distinguere le strategie progettuali per la scelta delle finiture superficiali esterne da quelle interne.

Lo studio è stato applicato anche ad una scala territoriale più ampia, in modo da poter valutare i possibili risparmi energetici e l'impatto positivo sull'ambiente derivante dall'applicazione delle suddette azioni di riqualificazione energetica sul 25 % degli edifici con tetto a falde del Sud Italia.

Lo studio di particolari finiture superficiali deriva dal fatto che, nei Paesi caratterizzati da un clima temperato, ossia contraddistinti dalla presenza di carichi termici significativi sia di riscaldamento che di raffrescamento, la climatizzazione estiva riveste un problema di fondamentale importanza, in quanto, essendo in continua diffusione, in ciascun edificio, anche ad uso privato, causa dell'aumento della frequenza e dell'intensità dei picchi di domanda di energia elettrica e dei rischi di black out. Pertanto, in presenza di elevati carichi di raffreddamento, l'obiettivo è ridurre la trasmissione dell'energia radiante solare all'interno degli ambienti confinati, innanzitutto, mediante un "controllo climatico passivo", impiegando

opportune strategie di involucro con adeguati materiali, tecniche e tecnologie utili per ridurre i carichi termici che gli impianti sono deputati a bilanciare.

Un ulteriore problema è determinato dal fatto che negli ultimi decenni, le ondate di calore estivo sono aumentate e gli eventi meteorologici futuri saranno, probabilmente, molto più gravi [84]. Questo porta ad un aumento dei carichi termici che devono essere opportunamente bilanciati dall'impianto HVAC.

Per fronteggiare questo problema, l'UE, come abbiamo visto nei precedenti capitoli, è impegnata nella riduzione della domanda energetica del 20 % entro il 2020 rispetto ai livelli del 1990 [16]. Per conseguire questa finalità, tutti gli Stati membri devono ottimizzare l'efficienza energetica degli edifici di nuova costruzione, prevedendo la realizzazione dei nZEBs e favorire la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente.

Un'ulteriore sfida consiste nel migliorare l'efficienza energetica del sistema edificio-impianti, garantendo, al contempo, un soddisfacente microclima interno per gli occupanti [85].

Nei climi temperati o caldi, l'uso di sistemi per il condizionamento estivo si è molto diffuso anche negli edifici residenziali, provocando l'aumento dei picchi della domanda di energia elettrica e causando blackout [86].

Negli edifici è possibile conseguire un risparmio energetico, intervenendo con opportune strategie di controllo climatico passivo ed attivo. Ad esempio, il controllo dell'albedo permette di raggiungere tre importanti effetti, riflettendo verso lo spazio la radiazione incidente ad onde corte:

1. attenuazione del riscaldamento globale;
2. riduzione del fenomeno “isola di calore”;
3. risparmio energetico negli edifici [87].

L'applicazione di particolari finiture superficiali (cool colors e cool paints) sul tetto dell'edificio può determinare un miglioramento anche del comfort termico interno in regime estivo, provocando una riduzione delle temperature medie radianti e di quelle operative [88]. Inoltre, il fabbisogno energetico complessivo dell'edificio per riscaldamento e per il raffrescamento può essere notevolmente ridotto [89].

In [90], gli autori hanno studiato le prestazioni di alcuni tetti giardino dal punto di vista energetico estivo. Essi hanno anche indagato le “cool paints”, soprattutto in climi caldi europei. Da tale studio si evince che l'impiego di queste finiture superficiali innovative è preferibile rispetto all'utilizzo dei tetti verdi, in quanto con le cool paints è possibile ottenere maggiori risparmi economici dovuti alla notevole riduzione dei guadagni solari. Viene, comunque, precisato che si rende necessaria una procedura di ottimizzazione per identificare la migliore tecnologia a seconda del clima e dell'edificio considerato [91].

Un altro studio esaminato [92] ha indagato le prestazioni energetiche di un edificio con tegole di laterizio innovative sul tetto a falde di un edificio. I risultati mostrano che mediante questo rivestimento è possibile ridurre il numero di ore in cui la temperatura operativa del sottotetto è superiore a 26 °C (circa il 18 % in estate, mentre il peggioramento in inverno è trascurabile).

In California e Florida, l'American Society for Testing and Materials (ASTM) ha introdotto, per i tetti poco inclinati e per quelli piani, l'indice di riflettanza solare (SRI), che combina l'emissività nel campo del lontano infrarosso ed il fattore di riflessione solare.

Nei climi temperati e caldi, l'uso di rivestimenti con un elevato indice SRI riduce la richiesta energetica estiva tra il 10 ed il 60% [93].

I cool roofs sono ampiamente promossi negli Stati Uniti. In Europa, invece, la ricerca sta focalizzando l'attenzione su quei materiali definiti "cool colors", cioè finiture superficiali con caratteristiche cromatiche simili a quelle dei materiali tradizionali e, dunque, con caratteristiche radiative nel campo ottico come i materiali edilizi tipici, ma con un fattore di riflessione della radiazione nella banda spettrale dell'infrarosso vicino (da 700 nm a 2'500 nm) molto alto [94].

Nei climi mediterranei, nel caso di coperture piane, l'utilizzo dei tetti bianchi è abbastanza frequente, ma nel parco edilizio prevalente italiano, costituito per il 70 % da edifici con coperture a falde, occorre innanzitutto preservare, nel caso dei centri storici, le caratteristiche cromatiche e monolitiche dei vari componenti edilizi. Come sopradescritto, gli attici presentano diverse criticità e, dunque, si caratterizzano da elevati costi energetici sia per il riscaldamento che per il raffrescamento.

Con l'attività di ricerca svolta, è stata effettuata una valutazione energetica, economica ed ambientale di diverse azioni di retrofit energetico.

Le simulazioni, condotte con gli strumenti dell'analisi energetica dinamica, fanno riferimento ad un edificio campione modellato con differenti peculiarità costruttivo-tipologiche tali da renderlo rappresentativo della realtà abitativa diffusa di ciascuna città europea presa in esame: Palermo, Roma, Milano, Siviglia, Parigi, Berlino, Londra e Stoccolma.

L'importanza di intervenire su queste unità abitative deriva anche dal fatto che, secondo stime elaborate dal Centro di ricerca di mercato del settore edile, CRESME [35], le coperture a falda presentano una superficie superiore, rispetto agli altri componenti edilizi, da sottoporre ad interventi di riqualificazione per poter ottenere elevati benefici sia dal punto di vista energetico/ambientali che da quello economico.

Sintetizzando da dati CRESME/SI, il numero di edifici e di abitazioni riferiti all'anno 2012 è il seguente:

1. numero di edifici pari a 11'779'270, così distribuiti:
 - nord: 4'928'768 edifici (41.8 %);
 - centro: 1'944'288 edifici (16.5 %);
 - sud: 4'906'214 edifici (41.7 %).
2. numero di abitazioni pari a 30'159'282, così distribuite:
 - nord: 14'063'715 (46.6 %);
 - centro: 5'630'400 (18.7 %);
 - sud: 10'465'167 (34.7 %).

Sul territorio nazionale, la quota maggiore di abitazioni (14'441'201 abitazioni, pari al 48 %) si trova in edifici plurifamiliari con 5 o più alloggi, mentre 11'919'078 abitazioni (40 % sul totale) sono collocate in edifici di piccole dimensioni (mono e bi familiari); le piccole palazzine di tre o quattro alloggi (3'799'003 abitazioni) assorbono, invece, il rimanente 13 %.

Le caratterizzazioni territoriali risultano rilevanti, osservando la macro-ripartizione geografica delle varie tipologie di edifici:

1. centro-nord: quasi identica distribuzione delle tipologie dimensionali rispetto al numero di abitazioni negli edifici (mono-bi familiari, 35.3 % nel nord e 34.0 % nel centro; tri-quadri familiari, 12.4 % nel nord e 13.6 % nel centro; edifici plurifamiliari, 52.3 % nel nord e 52.4 % nel centro);

2. sud: distribuzione molto più rivolta ai piccoli edifici, con il mono-bi familiare che pesa per il 48.2 %, il triquadri familiare per il 12.4 % e il plurifamiliare per il 39.5 %.

L'epoca di costruzione risale a:

1. prima del 1972 per il 43 %;
2. tra il 1972 e il 2001 per il 46 %;
3. dopo il 2001 per l'11 %.

La tipologia edilizia più frequente in Italia è la monofamiliare (26 %), poi troviamo la piccola palazzina (21 %) ed, infine, gli edifici plurifamiliari (a torre sono il 18 % e quelli in linea il 15 %).

Un altro dato importante è riferito alla presenza dell'11 % di edifici plurifamiliari realizzati per contiguità, assimilabile a circa l'8 % di case a schiera. Il 40 % degli edifici presenta un numero di piani compreso tra 3 e 5, il 37 % ha 2 piani e circa il 14 % oltre 5 piani.

Complessivamente gli edifici presentano:

1. copertura a falde con sottotetto non abitabile (46 %);
2. copertura a falde inclinate con sottotetto abitabile (23 %);
3. coperture piane, in maggioranza praticabili (32 %).

Il mercato potenziale di riqualificazione, nell'arco temporale 2014-2023, è suddiviso nel modo seguente:

1. 1554 milioni di m² di superfici da isolare, comprendente il nuovo ed il ristrutturato, composti da:
 - 474 milioni di m² di pareti verticali;
 - 813 milioni di m² di coperture;
 - 267 milioni di m² di solai e sottotetti.
2. considerando soltanto l'esistente, il potenziale è costituito da 967 milioni di m² (96.7 milioni di m² annui):
 - 217 milioni di m² di pareti verticali;
 - 691 milioni di m² di coperture;
 - 59 milioni di m² di solai e sottotetti.

Il piano terra, per 2/3 degli edifici, è chiuso da pareti o vetrate (48 % ricovero autoveicoli, 11 % negozi), mentre la quota rimanente presenta pilotis. Il 43 % degli edifici presenta piani interrati.

Da questi dati risulta che sono ancora molto pochi gli interventi di isolamento termico dell'involucro edilizio (4%).

Tali dati hanno influito ed indirizzato, quindi, la prima attività di ricerca, nell'individuare opportune azioni di riqualificazione energetica volte a ridurre il fabbisogno di energia per il riscaldamento ed il raffrescamento del parco edilizio prevalente in Italia (edifici con sottotetti aventi copertura a falde inclinate) mediante spessore ridotti dei materiali, semplici da porre in opera, economiche, compatibili dal punto di vista architettonico, ecc.

5.2.2 Approccio metodologico

Gli strumenti e le principali analisi svolte sono riportati nelle Fig. 5.2.2.1 e 5.2.2.2. sono stati indagati e/o valutati i seguenti aspetti o parametri:

- fabbisogno energetico dell'involucro edilizio;
- energia primaria annuale e stagionale;
- comfort ambientale (comfort adattivo);
- impatto ambientale in termini di emissioni di CO₂ equivalente;
- simple payback (SPB) e discounted payback period (DPB);
- risparmio energetico al variare degli impianti di climatizzazione e del prezzo dell'energia;
- valutazione della potenzialità di risparmio energetico, intervenendo a scala urbana;
- analisi parametriche: valutazione dei parametri che incidono maggiormente sugli effetti delle finiture superficiali;
- comparazione delle prestazioni delle cool paint con i PCM;

Come si può notare dalla Fig. 5.2.2.2 è stata effettuata anche una valutazione su scala territoriale più ampia (scala urbana) ed è stato individuato un fattore ex novo, denominato "Coating Factor" (CF), con il fine di ottimizzare la scelta delle finiture superficiali esterne ed interne in funzione delle caratteristiche climatiche della località considerata.

L'approccio metodologico per calibrare il modello energetico è partito dal Progetto Tabula [52], il quale definisce una matrice tipologica edilizia italiana [54] mediante il supporto di dati statistici e di dati ENEA. Per ciascun edificio tipo, il Progetto Tabula individua il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento, valutato mediante un'analisi in regime quasi stazionario. Tale fabbisogno energetico è stato, quindi, comparato con i dati di output della modellazione energetica realizzata mediante il software MC 11300 [70], che opera anch'esso in regime quasi stazionario, ed il codice di calcolo EnergyPlus [67] che, come visto precedentemente, consente di svolgere analisi energetiche in regime dinamico.

Come si può notare dalla Fig. 5.2.2.3, lo scostamento tra i risultati ottenuti con il modello creato mediante il software MC 11300 ed i dati del Progetto Tabula è pari al 2 %; invece, considerando i dati di output derivanti dal codice EnergyPlus, è possibile conseguire uno scostamento del 14 %. Diversi studi, tra cui [95], dimostrano che la variazione degli output derivanti da strumenti che lavorano in regime stazionario rispetto a quelli conseguiti con analisi in regime dinamico è del +/- 15 %.

Con l'intento di valutare la variazione percentuale dei risultati ottenuti con i due strumenti, si è cercato di uguagliare il più possibile le condizioni al contorno, prevedendo il funzionamento degli impianti, in EnergyPlus, 24h/24 e, cercando di minimizzare gli effetti della radiazione solare, ponendo pari a 0 il fattore α_{sol} e pari ad 1 ϵ_{inf} . In tal caso, possiamo notare che gli output dei due strumenti sono molto simili, rispetto al caso iniziale ($\Delta\% = 14\%$); infatti, il $\Delta\%$ è pari al 4 %. Inoltre, si può evincere che il software in regime stazionario considera in maniera marginale la radiazione solare; difatti, la fase di minimizzazione degli effetti della radiazione solare aumentano di poco il fabbisogno di riscaldamento (da 405 kWh/m²a si passa a 412 kWh/m²a). Al contrario, in EnergyPlus la fase di minimizzazione della radiazione solare riduce notevolmente i guadagni solari, determinando il passaggio da 347 kWh/m²a a 395 kWh/m²a.

Per tale attività sono stati individuati 4 reference buildings dell'edilizia residenziale in funzione della località (Fig. 5.2.2.4) e sono state svolte diverse valutazioni (analisi energetica, tecnico-economica ed ambientale), considerando la presenza di tipici sistemi impiantistici sia per il riscaldamento che per la climatizzazione estiva.

Le condizioni di simulazione considerate verranno analizzate in modo dettagliato nei paragrafi successivi. Si tenga presente che sono state svolte analisi con impianto di climatizzazione attivo e disattivo. Quest'ultimo caso è considerato per valutare il comfort termico adattativo come previsto dalla norma UNI EN ISO 15251 [96].

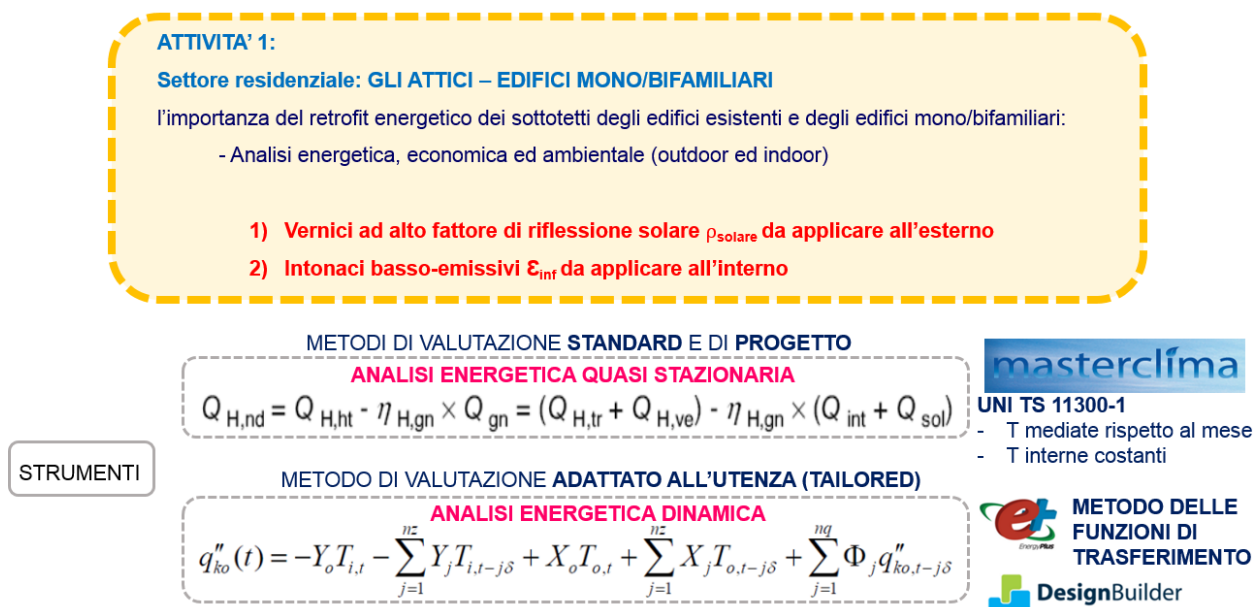


Fig. 5.2.2.1: Tematiche analizzate e principali strumenti impiegati



Fig. 5.2.2.2: Principali analisi svolte e determinazione del nuovo fattore "Coating Factor"

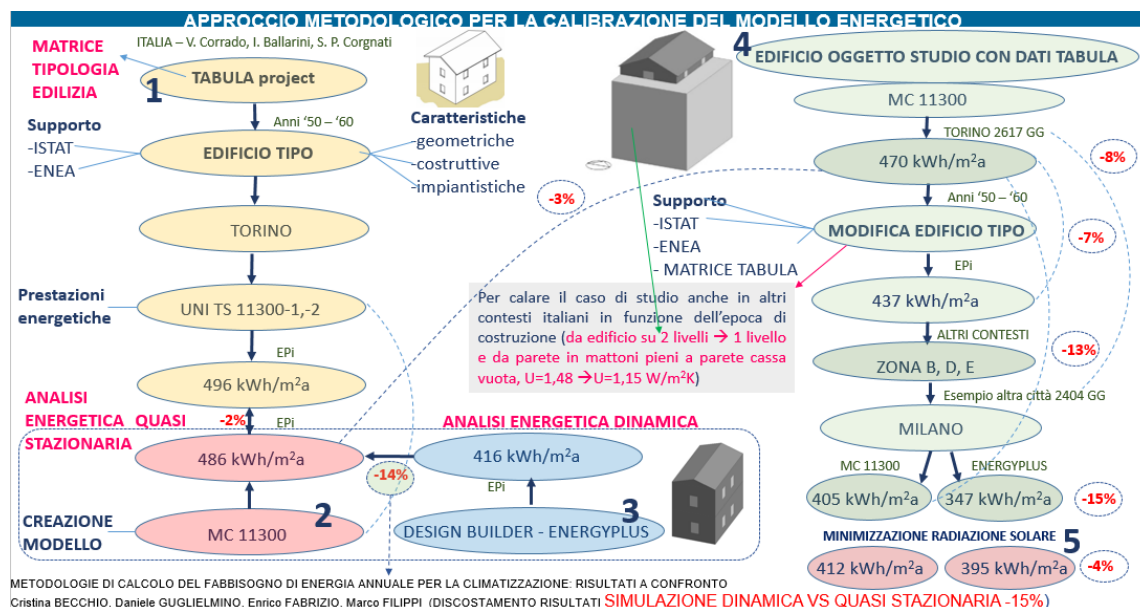


Fig. 5.2.2.3: Approccio metodologico utilizzato per calibrare il modello energetico

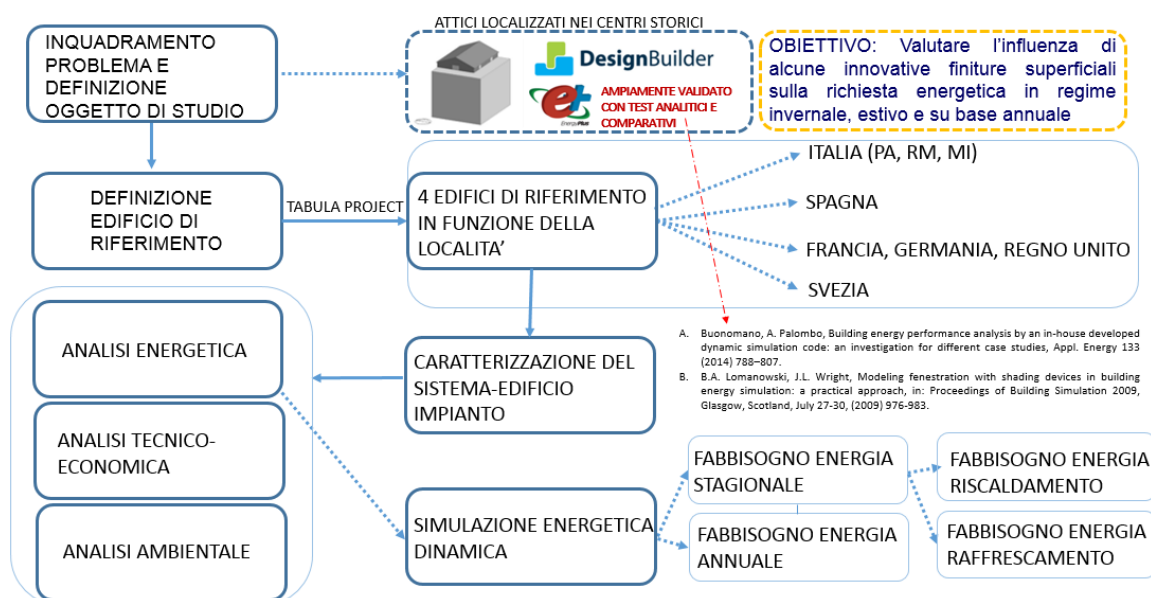


Fig. 5.2.2.4: Principali valutazioni

5.2.3 Caratteristiche radiative delle finiture superficiali innovative

L'energia derivante dal sole si può suddividere in energia radiante visibile (380 – 780 nm) ed energia radiante nel vicino infrarosso (780 – 3000 nm). Oltre i 3000 nm si trova la radiazione infrarossa (IR), campo in cui tutti i materiali emettono al di sopra della temperatura di 0 K.

La radiazione solare, quando incide su una superficie generica, viene parzialmente (Eq. 5.1):

1. trasmessa;
2. riflessa;
3. assorbita.

$$\tau(\lambda) + \alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (5.1)$$

Dalla Legge di Kirchoff (Eq. 5.2), per una certa lunghezza d'onda, il fattore di assorbimento è uguale all'emissività:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \quad (5.2)$$

Prendendo in esame l'involucro edilizio opaco e, dunque, tutti i componenti edilizi opachi, la trasmissione dell'energia radiante incidente è posta pari a 0 ($\tau(\lambda) = 0$). Pertanto, l'Eq. 5.1 viene riscritta nel modo seguente:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (5.3)$$

In regime estivo, il trasferimento di energia termica tra l'ambiente esterno e quello interno non dipende soltanto dalle caratteristiche termiche dell'involucro edilizio (trasmissione e capacità termica), dalla differenza di temperatura tra l'ambiente interno e quello esterno, ma anche dalla presenza della radiazione solare incidente sull'edificio (Eq. 5.4).

Per questo motivo si introduce un importante fattore, ossia la temperatura sole-aria per determinare i carichi di raffrescamento.

L'Eq. 5.5 definisce la temperatura sole-aria introdotta per il calcolo dei carichi termici estivi (UNI, 1995), che considera soltanto il fattore α della superficie, mentre trascura ε . Questa equazione può essere sostituita dall'Eq. 5.6 più complessa [65].

$$Q_{\text{sol}} = f(U; A; C_w; T_{\text{sol,air}}; T_i) \quad (5.4)$$

$$T_{\text{sol,air}} = T_{\text{ext}} + (\alpha_{\text{sol}} \cdot I / h_{\text{ext}}) \quad (5.5)$$

$$T_{\text{sol,air}} = T_{\text{ext}} + (\alpha_{\text{sol}} \cdot I / h_{\text{ext}}) - (\varepsilon_{\text{far-infrared}} \cdot \Delta R / h_{\text{ext}}) \quad (5.6)$$

dove:

- Q_{SOL} è la Potenza termica trasferita tramite l'involucro edilizio (W);
- U è la trasmittanza termica dei vari componenti edilizi ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$);
- A è la superficie dei componenti edilizi (m^2);
- C_w è la capacità termica delle pareti (J/K);

- T_i e T_{ext} sono rispettivamente le temperature interna ed esterna ($^{\circ}\text{C}$ o K);
- $T_{sol,air}$ è la temperature sole-aria ($^{\circ}\text{C}$ o K);
- α_{sol} è il fattore di assorbimento solare delle finiture superficiali (adimensionale);
- I irradiazione solare globale incidente sulle superfici ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$);
- h_{ext} è il coefficiente globale di trasferimento superficiale globale delle superfici esterne ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$);
- $\epsilon_{far-infrared}$ è l'emissività termica dei component edilizi esterni riferita al lontano infrarosso (adimensionale);
- ΔR è la differenza tra flusso radiativo emesso dal corpo nero alla temperatura dell'aria esterna ed il flusso radiativo (onde lunghe) derivante dal cielo e dall'ambiente circostante ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

La temperatura sole-aria è una temperatura fittizia dell'aria esterna che, in assenza di scambi termici radiativi, consentirebbe di avere uno scambio termico superficiale pari a quello reale dovuto non soltanto alla temperatura dell'aria esterna, ma ad un effetto combinato della temperatura dell'ambiente esterno e dell'irraggiamento solare.

Quando una parete è investita dalla radiazione solare di intensità I (W/m^2), la parete assorbe parzialmente l'energia incidente secondo il suo coefficiente α_{sol} , producendo un innalzamento della temperatura della superficie esterna. Tale variazione di temperatura produce una variazione del flusso termico che interessa il componente opaco rispetto alla situazione di assenza della radiazione solare, al punto tale che la superficie potrebbe riscaldarsi fino ad invertire il verso del flusso termico scambiato con l'aria esterna, ossia in condizioni estive potrebbe uscire anziché entrare ed in condizioni invernali potrebbe entrare anziché uscire.

In pratica tutto avviene come se l'aria esterna avesse una temperatura fittizia più elevata, tale da fornire per scambio liminare anche il flusso termico corrispondente alla radiazione solare.

Tuttavia, il surriscaldamento estivo degli edifici, e ciò che ne consegue in termini di fabbisogni energetici, può essere limitato utilizzando delle particolari finiture superficiali, le cosiddette cool paints, o più in dettaglio (ad esempio facendo riferimento al componente edilizio “tetto”) i cosiddetti cool roofs, ossia coperture rivestite con finiture superficiali contraddistinte da:

1. bassi valori di α_{SOL} a cui corrispondono alti valori di ρ_{SOL} ;
2. alti valori di ϵ_{INF} .

Queste caratteristiche spettrali consentono ai componenti edilizi opachi di restituire all'atmosfera, mediante il fenomeno dell'irraggiamento termico, la maggior parte della frazione assorbita dell'irradiazione solare. Del resto, dall'Eq. 5.6 è evidente che bassi valori di α_{sol} ed alti valori di ϵ_{inf} comportano un benefico abbassamento di $T_{sol,air}$.

Per quanto riguarda il fattore α_{SOL} delle superfici esposte alla radiazione solare, quando i dati reali non sono disponibili, possono essere impiegati i seguenti valori:

- colore chiaro delle superfici esterne: $\alpha_{SOL} = 0.3$;
- colore medio delle superfici esterne: $\alpha_{SOL} = 0.6$ (questo è il valore che è stato considerato);
- colore scuro delle superfici esterne: $\alpha_{SOL} = 0.9$.

Questo è il criterio suggerito dalla UNI TS 11300-1 [97]. In realtà, come mostrato in precedenza, anche l'emissività termica gioca un ruolo molto significativo.

Nel presente lavoro, è stato simulato il comportamento energetico in regime dinamico di diversi reference buildings del settore residenziale (descritti nei paragrafi successivi), innanzitutto, caratterizzati dalla presenza di alcune finiture superficiali tradizionali, ovvero

intonaco di colore medio con ρ_{SOL} pari a circa 0.5 e tegole rosse di argilla con ρ_{SOL} pari a 0.3 ed ϵ_{INF} pari a 0.90. Successivamente è stato studiato il comportamento energetico degli edifici, prendendo in esame alcune finiture superficiali innovative (Fig. 5.2.3.1, Tab. 5.2.3.1), quali:

1. rivestimenti innovativi esterni multiminerali termoriflettenti per la copertura a falda di colore rosso contraddistinta da un alto fattore ρ_{SOL} (0.79) e da un'alta ϵ_{INF} (circa 0.90) per ridurre la richiesta energetica estiva;
2. finitura superficiale di colore bianco per le superfici esterne delle pareti verticali con un alto fattore ρ_{SOL} (0.88) ed un'alta ϵ_{INF} (circa 0.90) per contribuire alla riduzione della domanda di energia di raffrescamento;
3. intonaco basso-emissivo (ϵ_{INF} pari a 0.62) ottenuto integrando le nanotecnologie con materiali edili tradizionali; in dettaglio, speciali rivestimenti ottenuti miscelando nanoparticelle di ceramica (brevettate in collaborazione con la N.A.S.A.) con intonaci tradizionali consentono di ottenere dei rivestimenti innovativi da applicare sulle superfici interne dell'involucro edilizio opaco, in modo da ridurre la richiesta energetica invernale. Questo coating presenta un'elevata riflessione, rispetto ai tradizionali intonaci, nel campo dell'infrarosso, agendo sulla radiazione ad onda lunga proveniente dallo spazio interno. Si ottiene, quindi, un sostanziale aumento della resistenza superficiale interna pari al 26.5 % per i componenti verticali e pari al 18.5 % per i componenti orizzontali (come attestato dalla società CertiMaC, 2011) [98].

Sebbene l'importanza dei rivestimenti esterni e del guadagno solare sono accuratamente studiati in molti studi presenti in letteratura, gli effetti derivanti dalla combinazione dei due interventi sopradescritti non sono affrontati, soprattutto se si estende il ragionamento al fabbisogno energetico dell'involucro edilizio ed alla richiesta di energia primaria durante l'intero arco annuale.

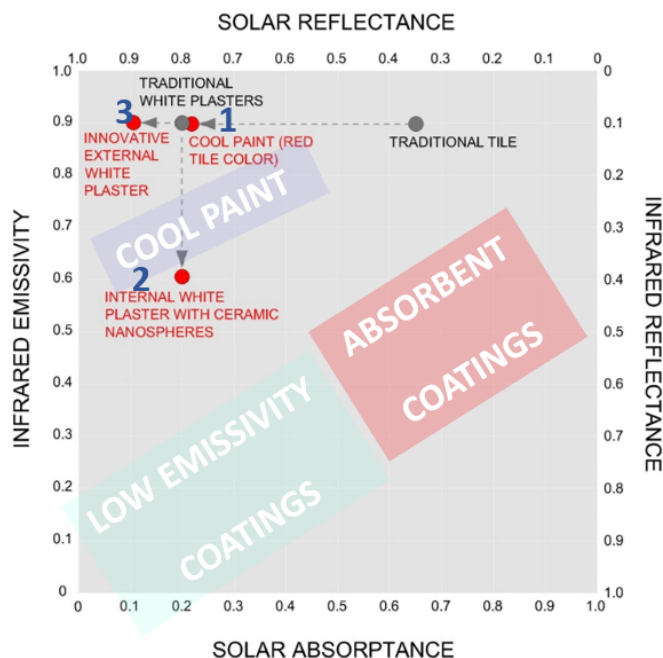


Fig. 5.2.3.1: Caratteristiche spettrali delle finiture superficiali analizzate

Finiture superficiali		α_s	ρ_s	ϵ_{inf}
Tradizionali	Intonaco bianco	0.50	0.50	0.90
	Tegole e laterizi	0.70	0.30	0.90
Proposte	Intonaco bianco interno	0.20	0.80	0.62
	Intonaco bianco esterno	0.12	0.88	0.90
	Vernice rosso tegola	0.21	0.79	0.89

^a SRI della vernice rosso-tegola è pari a 99.

Tab. 5.2.3.1: Caratteristiche delle finiture superficiali tradizionali ed innovative proposte

5.2.4 L'incidenza delle finiture superficiali degli edifici residenziali esistenti sul fabbisogno energetico, sui costi di gestione e sull'impatto ambientale

5.2.4.1 Caso di studio

Il presente paragrafo mostra i risultati ottenuti esaminando l'incidenza delle finiture superficiali interne ed esterne sulla domanda di energia degli impianti di riscaldamento/climatizzazione estiva, sul rilascio in atmosfera di anidride carbonica e sulla convenienza tecnico-economica.

L'attività di ricerca è stata effettuata utilizzando un software di simulazione energetica degli edifici in regime dinamico, Design Builder [66], che ha come motore di calcolo EnergyPlus. EnergyPlus è stato validato mediante dati sperimentali [99]; inoltre, ampie procedure di convalida per molteplici località e differenti edifici sono disponibili. Numerosi test sono stati condotti sul codice EnergyPlus, ad esempio per l'involucro edilizio in [100] e per il sistema HVAC in [101]. In [102], EnergyPlus è stato oggetto di prove comparative con altri codici di simulazione e lo scostamento rilevato dei risultati ottenuti è quasi sempre inferiore al 10 %.

Il modello energetico è stato opportunamente calibrato come è stato descritto nel paragrafo 5.2.2.

Lo studio degli effetti di determinate finiture superficiali sull'involucro edilizio mette in mostra che, a seconda delle loro caratteristiche, possono derivare benefici oppure aggravii energetici in funzione della stagione analizzata. Questo è dovuto dal fatto che le varie finiture superficiali inducono una riduzione oppure un innalzamento degli apporti solari gratuiti.

In generale, si può affermare che i guadagni solari, in inverno, avranno un'incidenza benefica soprattutto quando le superfici edilizie si caratterizzano da elevati valori di α_{SOL} e/o bassa ϵ_{INF} ma, come evidenziato precedentemente, ciò induce all'aumento della temperatura interna degli ambienti (anche della temperatura radiante ed operativa) e, di conseguenza, all'incremento della richiesta energetica per la climatizzazione estiva.

Questa attività di ricerca, svolta sia su base stagionale che annuale, ha valutato l'effetto di alcuni interventi di retrofit energetico compatibile dal punto di vista architettonico, in grado di preservare le caratteristiche monolitiche e cromatiche dei componenti edilizi esistenti.

Il modello energetico elaborato nel codice di calcolo è stato analizzato con condizioni al contorno prossime a quelle reali, quindi, non sono state usate condizioni al contorno convenzionali (temperature costanti per 24 h al giorno all'interno degli ambienti, condizioni di

occupazione standardizzate, ecc.), queste ultime necessarie per la certificazione energetica, che ha il fine di confrontare le prestazioni energetiche di differenti edifici secondo un utilizzo standard.

Lo strumento operativo indispensabile per una analisi accurata delle prestazioni energetiche dello stock edilizio, necessario a valutare le potenzialità derivanti da interventi di riqualificazione energetica, risulta essere la simulazione termo-energetica dinamica, che supera i limiti dell'approccio stazionario basato su dati di riferimento convenzionali.

Tali analisi numeriche consentono di ottenere valutazioni qualitative e quantitative avvalendosi di dati climatici orari e dei carichi endogeni variabili.

In tale modo, è possibile anche valutare le potenzialità derivanti dall'applicazione a scala urbana di determinate soluzioni progettuali, sia per quanto riguarda l'involucro edilizio (composizione delle strutture, grado di isolamento, capacità termica, parametri termofisici dinamici, ecc.) che relativamente agli impianti (consentendo di confrontare diverse ipotesi).

La simulazione energetica dinamica è articolata nelle seguenti fasi:

1. scelta dell'intervallo di simulazione;
2. scelta dei parametri di controllo del sistema;
3. scelta della destinazione d'uso dell'edificio e definizione dei vari parametri correlati all'attività;
4. definizione delle condizioni climatiche e definizione dell'orientamento dell'involucro;
5. definizione del modello geometrico e dei componenti edilizi;
6. caratterizzazione dei sistemi impiantistici asserviti all'edificio;
7. definizione del periodo di funzionamento degli impianti.

Lo studio, come già detto, è stato condotto su differenti edifici rappresentativi del patrimonio edilizio residenziale italiano e di altre città europee, con epoca di costruzione ricadente nel periodo 1920-1960. In particolare, sono stati esaminati gli attici, soprattutto quelli dei centri storici. Le principali caratteristiche geometriche e termo-fisiche dell'attico sono riportate in Fig. 5.2.4.1.1 e Tabelle 5.2.4.1.1. – 5.2.4.1.2. Da esse si può notare che per ogni città è stato considerato e modellato un reference building diverso con morfologia e peculiarità dimensionali uguali per ciascuna città, ma con caratteristiche termofisiche differenti dei componenti dell'involucro edilizio (in relazione alla località ed in linea con i valori usuali degli edifici residenziali costruiti nel periodo di riferimento) e con valori diversi anche relativi all'efficienza energetica ed alle ore di funzionamento del sistema HVAC. Si può, ad esempio notare che l'edificio di riferimento svedese mostra valori di trasmittanza termica unitaria (U) molto migliori rispetto agli altri casi.

L'edificio (Fig 5.2.4.1.1) è stato suddiviso in tante zone termiche quante sono le effettive destinazioni d'uso dei diversi ambienti, in modo da valutare opportunamente i vari fenomeni di trasmissione del calore ed il bilancio energetico.

Tutti i dati sono sintetizzati in Fig. 5.2.4.1.2, che riporta le condizioni di simulazione considerate.

Lunghezza (direzione nord-sud): 11.0 m		Altezza minima: 1.5 m	
Larghezza (est-ovest direzione): 9.0 m		Altezza massima: 3.5 m	
Area di calpestio: 99.0 m ²	Volume: 247.5 m ³	T _{set point} (riscaldamento/raffrescamento): 20 °C / 26 °C	
Indice metabolico: 1.5 met per persona		File climatico: IWE C	$\eta_{\text{termoelettrico, ITALIA}}$: 0.466 $\eta_{\text{termoelettrico, SPAGNA}}$: 0.465 $\eta_{\text{termoelettrico, FRANCIA}}$: 0.547 $\eta_{\text{termoelettrico, GERMANIA}}$: 0.475 $\eta_{\text{termoelettrico, REGNO UNITO}}$: 0.445 $\eta_{\text{termoelettrico, GRECIA}}$: 0.37
Carichi termici interni: 20 W·m ⁻² (10 illumination, 10 computer/kitchen)			
η_{gl} (riscaldamento) = 0.66	SEER _{MI, PS, BE, LO, ST} (raffrescamento) = 2.9	SEER _{RM} (raffrescamento) = 2.8	SEER _{PA, SV} (raffrescamento) = 2.7

Tab. 5.2.4.1: Principali caratteristiche edilizie ed impiantistiche

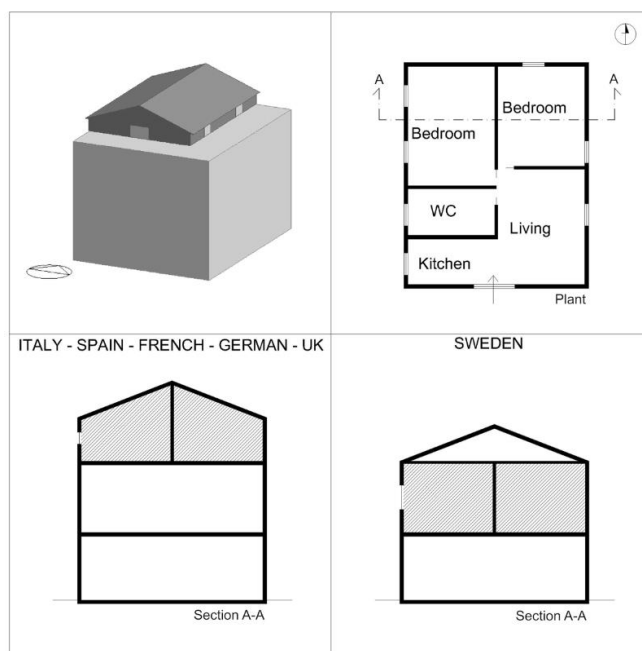


Fig. 5.2.4.1.1: Edifici di riferimento, pianta e sezioni

Funzionamento impianti	Palermo	Siviglia	Roma	Milano	Parigi	Londra	Berlino	Stoccolma
	8 h _{risc} , 10 h _{raff}		12 h _{risc} , 10 h _{raff}	14 h _{risc} , 10 h _{raff}				
HDD, K·d	724	916	1444	2454	2644	2866	3156	4239
CDD, K·d	3225	3128	2333	1771	1209	864	1125	683
Radiazione solare globale mensile (luglio) Wh·m ⁻²	7268	7180	6338	5402	5311	4906	5040	5360

Tab. 5.2.4.1.2: Caratteristiche climatiche delle città considerate e periodo di funzionamento degli impianti [74] [103]

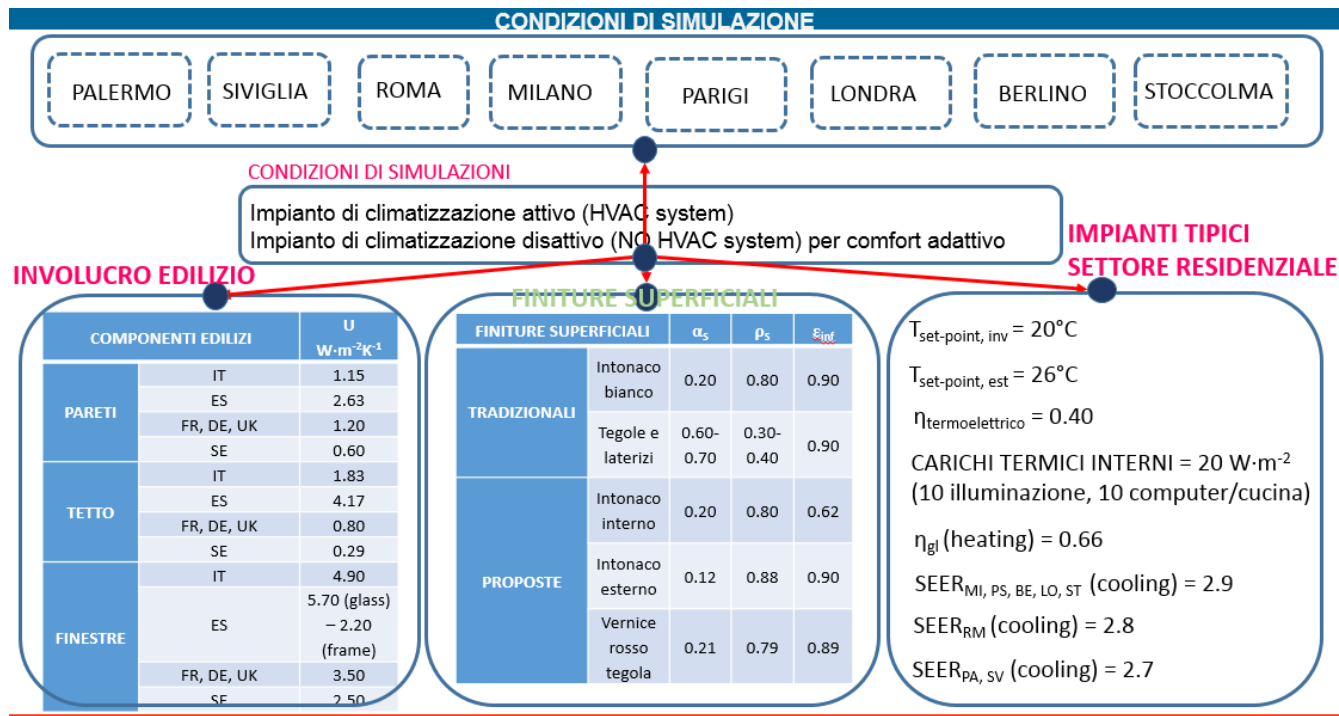


Fig. 5.2.4.1.2: Condizioni di retrofit analizzate riguardo a: clima, di simulazione, trasmittanza termica, caratteristiche radiative ed impianti

Per ciascun edificio di riferimento, sono analizzate quattro misure di riqualificazione energetica, semplici da effettuare ed economiche che, a seconda delle condizioni climatiche, risultano vantaggiose oppure svantaggiose dal punto di vista energetico-economico-ambientale.

La prima azione riguarda l'uso della “cool paint” di colore rosso-tegola, sopra descritta, sul tetto a falde inclinate (quindi sulle tegole di terzino).

Il secondo intervento proposto riguarda l'utilizzo della “cool paint” sulle tegole di laterizio e dell'intonaco innovativo bianco sulla superficie esterna delle pareti verticali.

Il terzo intervento riguarda l'uso di intonaco basso-emissivo sulla superficie interna delle pareti e del soffitto. È anche interessante notare che l'uso dell'intonaco termo-riflettente interno aumenta l'efficienza di emissione dell'impianto di riscaldamento da 0.90 a 0.95 [104], con conseguente aumento del rendimento globale medio stagionale dell'impianto di riscaldamento (nel caso esaminato, da 0.66 a 0.70), riducendo, quindi, il fabbisogno di energia del sistema di riscaldamento.

Infine, il quarto intervento riguarda l'impiego combinato della vernice rosso tegola sul tetto a falde e dell'intonaco basso-emissivo sulla superficie interna delle pareti e del soffitto.

Per una maggiore chiarezza, si riporta una sintesi di quanto sopradescritto. Per tutte le città sono previste le seguenti azioni:

- obiettivo I (interventi 1 e 2 sopra descritti): ridurre la richiesta energetica estiva:
 - cool paint di colore rosso-tegola sul tetto;
 - cool paint di colore bianco sulla superficie esterna dei muri;

- obiettivo II (intervento 3): ridurre la richiesta energetica invernale:
-intonaco interno basso-emissivo (intonaco tradizionale + nanosfere di ceramica);
- obiettivo III (intervento 4): ridurre la richiesta energetica annuale:
- cool paint di colore rosso-tegola sul tetto + intonaco interno basso-emissivo (intonaco tradizionale + nanosfere di ceramica).

L'impianto di riscaldamento, costituito da un semplice sistema autonomo tipico dell'edilizia residenziale, presenta un rendimento globale stagionale (η_{gl}), ottenuto con l'Eq. (5.7) riportata nelle specifiche tecniche italiane UNI TS 11300-2 [104]:

$$\eta_{gl} = \eta_g \cdot \eta_d \cdot \eta_r \cdot \eta_e \quad (5.7)$$

dove:

- η_{gl} è il rendimento globale medio stagionale (0.66, che passa a 0.70 nel caso in cui si prevede l'applicazione dell'intonaco interno basso-emissivo) ottenuto dal prodotto dei quattro sottorendimenti;
- η_g è il rendimento di generazione (0.88 per una caldaia tradizionale non a condensazione);
- η_d è il rendimento di distribuzione (0.98 quando le tubazioni sono installate nelle pareti esterne);
- η_r è il rendimento di regolazione (0.85 per il controllo semplice on-off della caldaia);
- η_e è il rendimento di emissione (0.90 in presenza di radiatori installati sulle pareti esterne non isolate).

L'impianto di raffrescamento estivo considerato presenta un coefficiente di efficienza energetica stagionale, SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio), variabile in funzione della località, come si può vedere in Tab. 5.2.4.1. Anche nel caso del rendimento del parco termoelettrico sono stati presi in considerazione i valori di ciascuna Nazione (Tab. 5.2.4.1) [105].

L'analisi energetica ha permesso di valutare il fabbisogno termico dell'involucro edilizio per il riscaldamento (TE_h), per il raffrescamento (TE_c) (Fig. 5.2.4.2.1) e quello complessivo annuale (TE_y) (Fig. 5.2.4.2.2), calcolato come somma dei valori assoluti dei fabbisogni energetici stagionali; inoltre, è stata determinata l'energia primaria richiesta (PE) (Fig. 5.2.4.2.3). La differenza tra questi due indici energetici dipende dall'efficienza energetica del Sistema HVAC e dall'efficienza energetica del parco termoelettrico (Eq. 5.8-5.9) :

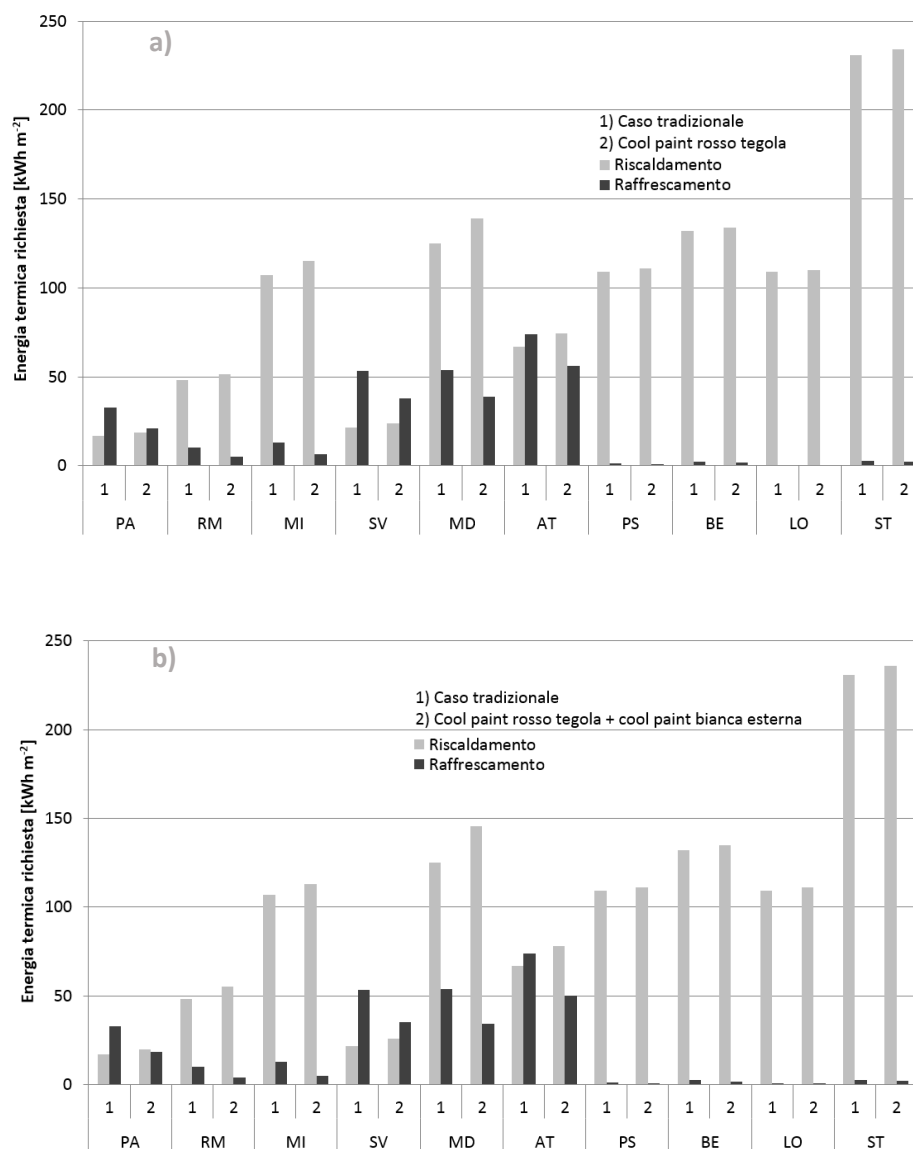
$$PE_{\text{riscaldamento}} = (TE_h / \eta_{gl}) \quad (5.8)$$

$$PE_{\text{raffrescamento}} = (TE_c / SEER) / \eta_{\text{termoelettrico, NAZIONALE}} \quad (5.9)$$

5.2.4.2 Risultati energetici

La Fig. 5.2.4.2.1 mostra le richieste stagionali di energia termica (TE) dei vari edifici di riferimento con finiture superficiali tradizionali e con finiture superficiali innovative; invece, la

Fig. 5.2.4.2.2 mostra la richiesta di energia termica annuale (TE_y). La Fig. 5.2.4.2.1 mette in evidenza che le azioni sulle superfici esterne (ad esempio, le azioni 1 e 2 riguardante la vernice rosso tegola sul tetto a falda e la vernice rossa + l'intonaco bianco innovativo sulle pareti verticali esterne) riducono TE_c , ma abbassano sensibilmente anche il guadagno solare, determinando l'aumento dell'energia richiesta nella stagione invernale, TE_h . Al contrario, gli interventi sulle superfici interne (azione 3) diminuiscono TE_h per tutte le città.



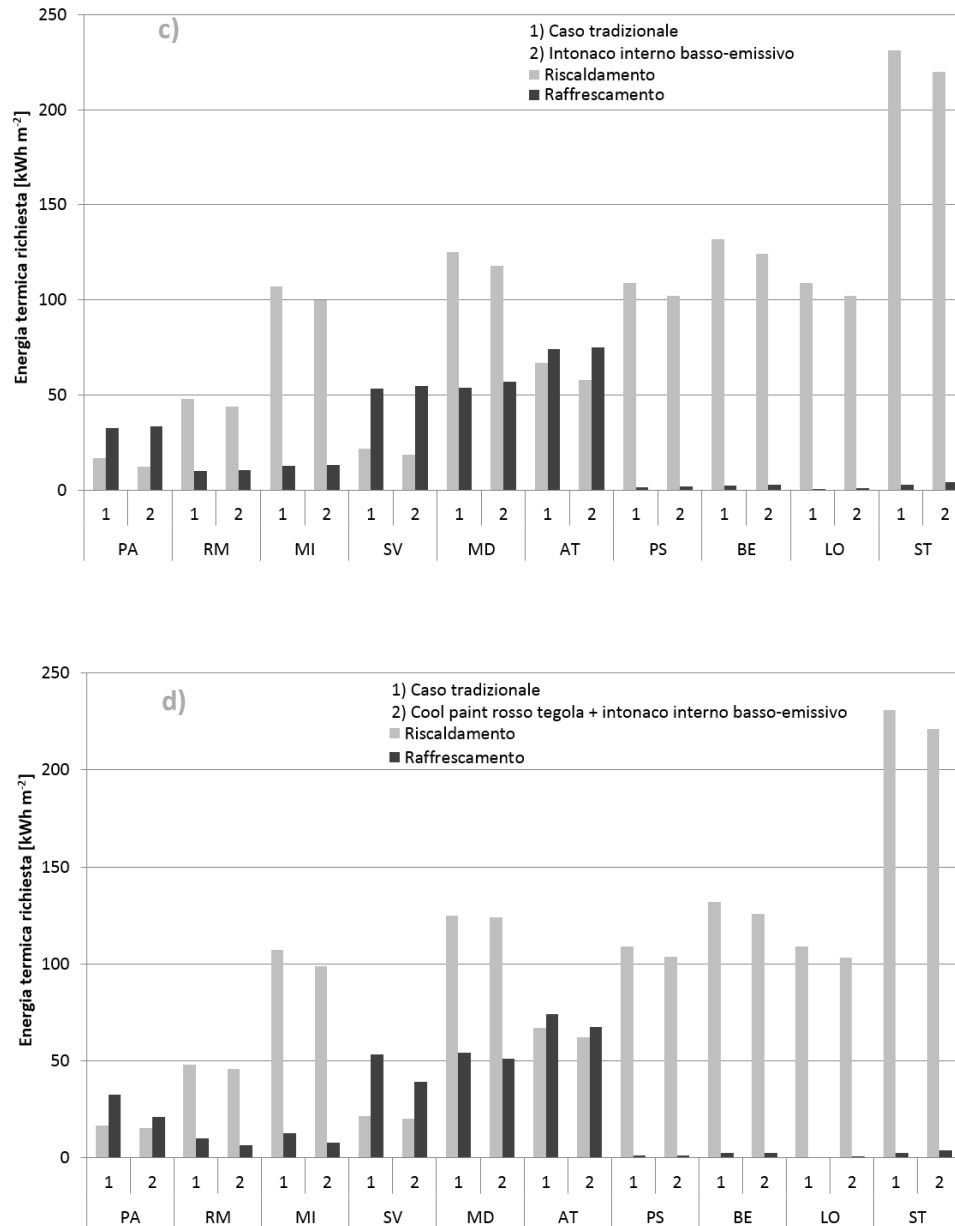


Fig. 5.2.4.2.1: Energia termica stagionale richiesta: a) cool paint di colore rosso tegola sul tetto; b) cool paint di colore rosso tegola sul tetto + cool paint bianca sulle superfici esterne delle pareti; c) intonaco interno basso-emissivo; d) cool paint di colore rosso tegola sul tetto + intonaco interno basso-emissivo. PA Palermo, RM Roma, MI Milano, SV Siviglia, MD Madrid, AT Atene, PS Parigi, BE Berlino, LO Londra, ST Stoccolma

La prima misura di retrofit energetico (“cool paint” di colore rosso tegola sul tetto a falde inclinate) è più adatta per i climi più caldi (per Siviglia e Palermo, rispettivamente TE_y diminuisce del 17.3 % e 20.4 %), poco adeguato al clima intermedio (Roma, TE_y diminuzione del 2.9 %), mentre risulta essere svantaggiosa per i climi più freddi (per Milano, Parigi, Berlino, Londra e Stoccolma, TE_y aumenta di 0.3-1.6 %). È interessante notare che la variazione di TE è più elevata quando si osservano i casi stagionali rispetto al caso totale annuale (questo vale anche per le altre azioni). Ad esempio, con la prima azione (Fig. 5.2.4.2.1.a) e analizzando i risultati per la città di Palermo, TE_c diminuisce del 36.4 %, TE_h aumenta del 10.7 %, mentre TE_y

diminuisce del 20.4 %. Per il caso di Milano, invece, la TE_c diminuisce del 50.0 %, TE_h aumenta del 7.5 %, mentre TE_y aumenta dello 0.9 % (Tab. 5.2.4.2.1).

La seconda azione (“cool paint” di colore rosso tegola sul tetto a falde inclinate + intonaco bianco innovativo sulle superfici esterne delle pareti non rivestite) conduce a risultati simili all’azione 1.

Il terzo intervento (intonaco basso-emissivo sulle superfici interne del tetto e delle pareti) consente di minimizzare TE_y per tutte le città considerate (tra il 2.3 % al 7.3 %).

L’ultima azione analizzata (“cool paint” di colore rosso tegola sul tetto a falde inclinate + intonaco basso-emissivo sulle superfici interne del tetto e delle pareti), che combina la prima azione con la terza, conduce alla riduzione dell’energia termica globale, TE_y , dal 2.4 % (nel caso di Madrid) al 26.5 % (per la città di Palermo).

In Fig. 5.2.5.2.3 è riportato il fabbisogno di energia primaria (PE), mentre le variazioni percentuali di tale indice delle varie azioni considerate rispetto al caso di riferimento sono mostrate in Tab. 5.2.4.2.2.

Tali analisi evidenziano che gli interventi sulle superfici esterne (prima e seconda azione) sono:

- adatti per i più caldi: infatti, PE è ridotto del 11.8 -13.1 % (Siviglia e Palermo), mentre TE_y diminuisce del 17.3-20.4 %;

- svantaggiosi per Roma e per i climi freddi (PE annuale: aumento di 0.1-4.2 %).

Al contrario, la terza e quarta azione risultano essere vantaggiose per tutti i climi analizzati (PE annuale diminuisce del 6.3-25.1 %).

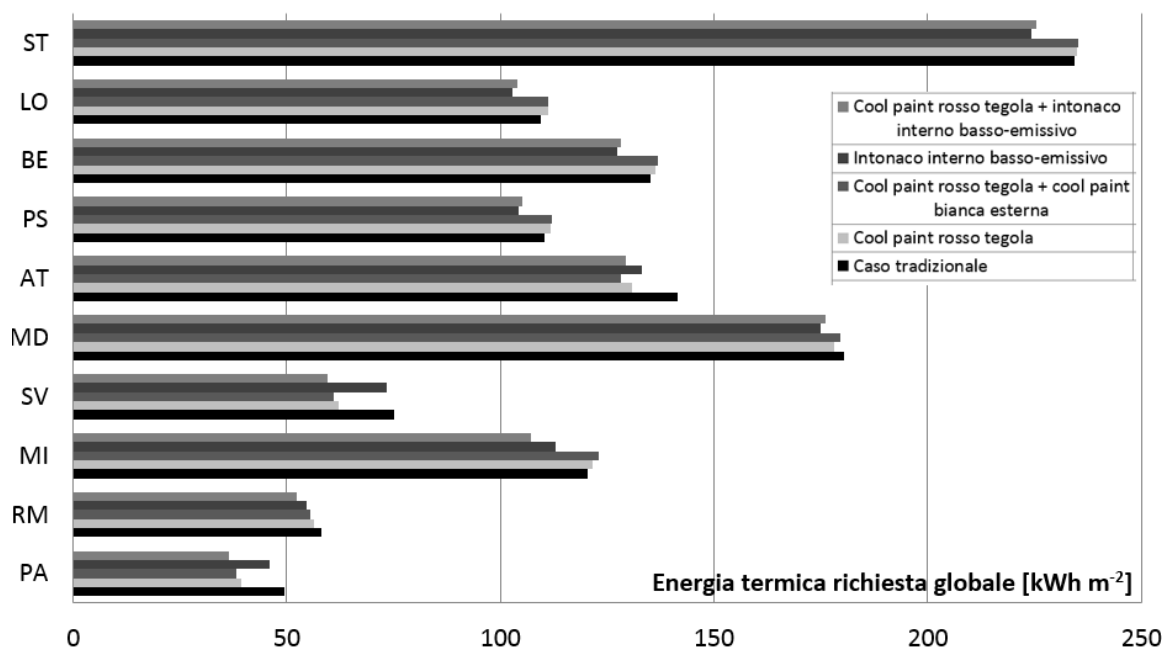


Fig. 5.2.4.2.2: Energia termica globale richiesta. PA Palermo, RM Roma, MI Milano, SV Siviglia, MD Madrid, AT Atene, PS Parigi, BE Berlino, LO Londra, ST Stoccolma

Variazione %	Palermo	Roma	Milano	Siviglia	Madrid	Atene	Parigi	Berlino	Londra	Stoccolma
Cool paint rosso tegola sul tetto a falde	-20.4	-2.9	0.9	-17.3	-1.2	-7.5	1.3	0.7	1.6	0.3
Cool paint rosso tegola sul tetto a falde + cool paint bianca esterna su pareti	-22.8	-4.8	2.1	-18.6	-0.4	-9.4	1.5	1.2	1.7	0.4
Intonaco interno basso-emissivo	-7.3	-6.4	-6.2	-2.3	-2.9	-5.9	-5.6	-5.8	-6.1	-4.3
Cool paint rosso tegola sul tetto a falde + intonaco interno basso-emissivo	-26.5	-10.3	-11.1	-20.7	-2.4	-8.4	-4.8	-5.2	-5.0	-3.7

Tab. 5.2.4.2.1: Variazione percentuale dell'energia termica richiesta dall'involucro edilizio, considerando le varie azioni di riqualificazione energetica rispetto ai reference buildings con finiture superficiali tradizionali

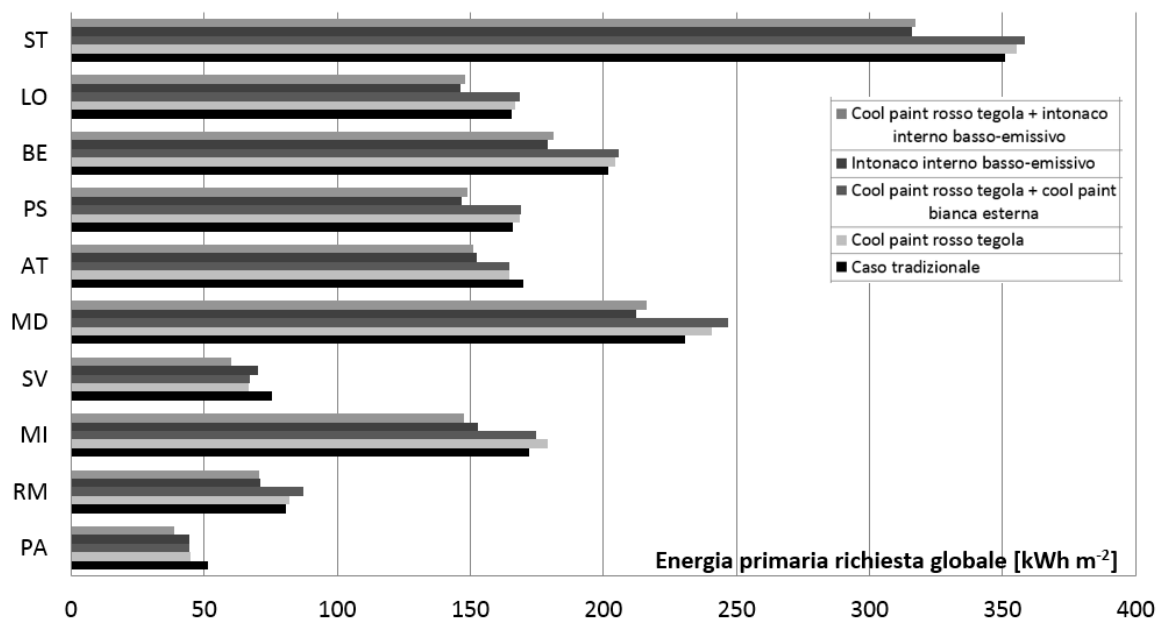


Fig. 5.2.4.2.3: Energia primaria globale richiesta. PA Palermo, RM Roma, MI Milano, SV Siviglia, MD Madrid, AT Atene, PS Parigi, BE Berlino, LO Londra, ST Stoccolma

Variazione %	Palermo	Roma	Milano	Siviglia	Madrid	Atene	Parigi	Berlino	Londra	Stoccolma
Cool paint rosso tegola sul tetto a falde	-13.1	1.4	4.1	-11.8	4.2	-2.9	1.6	1.2	0.8	0.1
Cool paint rosso tegola sul tetto a falde + cool paint bianca esterna su pareti	-13.5	7.7	4.4	-12.8	6.8	-3.1	1.8	1.9	1.8	0.2
Intonaco interno basso-emissivo	-13.8	-11.9	-11.1	-6.9	-8.1	-10.3	-11.4	-11.2	-11.6	-10.2
Cool paint rosso tegola sul tetto a falde + intonaco interno basso-emissivo	-25.1	-12.5	-14.2	-20.1	-6.3	-10.9	-10.2	-10.3	-10.6	-9.7

Tab. 5.2.4.2.2: Variazione percentuale dell'energia primaria richiesta, considerando le varie azioni di riqualificazione energetica rispetto ai reference buildings con finiture superficiali tradizionali

La Fig. 5.2.4.2.4 analizza l'incidenza delle finiture superficiali, interne ed esterne, al variare del livello di isolamento termico dell'involucro edilizio.

La prima azione ("cool paint" di colore rosso tegola sul tetto a falde inclinate), nel caso di involucro edilizio non isolato termicamente, a Palermo, consente di ridurre (del 34.5 %) il fabbisogno di energia primaria in regime estivo, PE_c , ma induce un aumento di quello invernale (del 9.5 %). Il fabbisogno energetico globale, PE_y , è ridotto dell'11.2%. Considerando, ad esempio, il caso di edificio isolato termicamente (3 cm), PE_c si riduce del 23 %.

Ancora più evidente (città di Milano) è l'effetto dell'isolamento termico, sull'incidenza delle finiture superficiali nel caso dell'azione 3 (intonaco basso-emissivo sulle superfici interne). Infatti, si può notare che PE_h si riduce del:

- 12.4 %, nel caso di involucro edilizio non isolato;
- 8.7 %, considerando uno spessore di isolante termico pari a 3 cm;
- 6.8 %, nel caso di involucro mediamente isolato (5 cm).

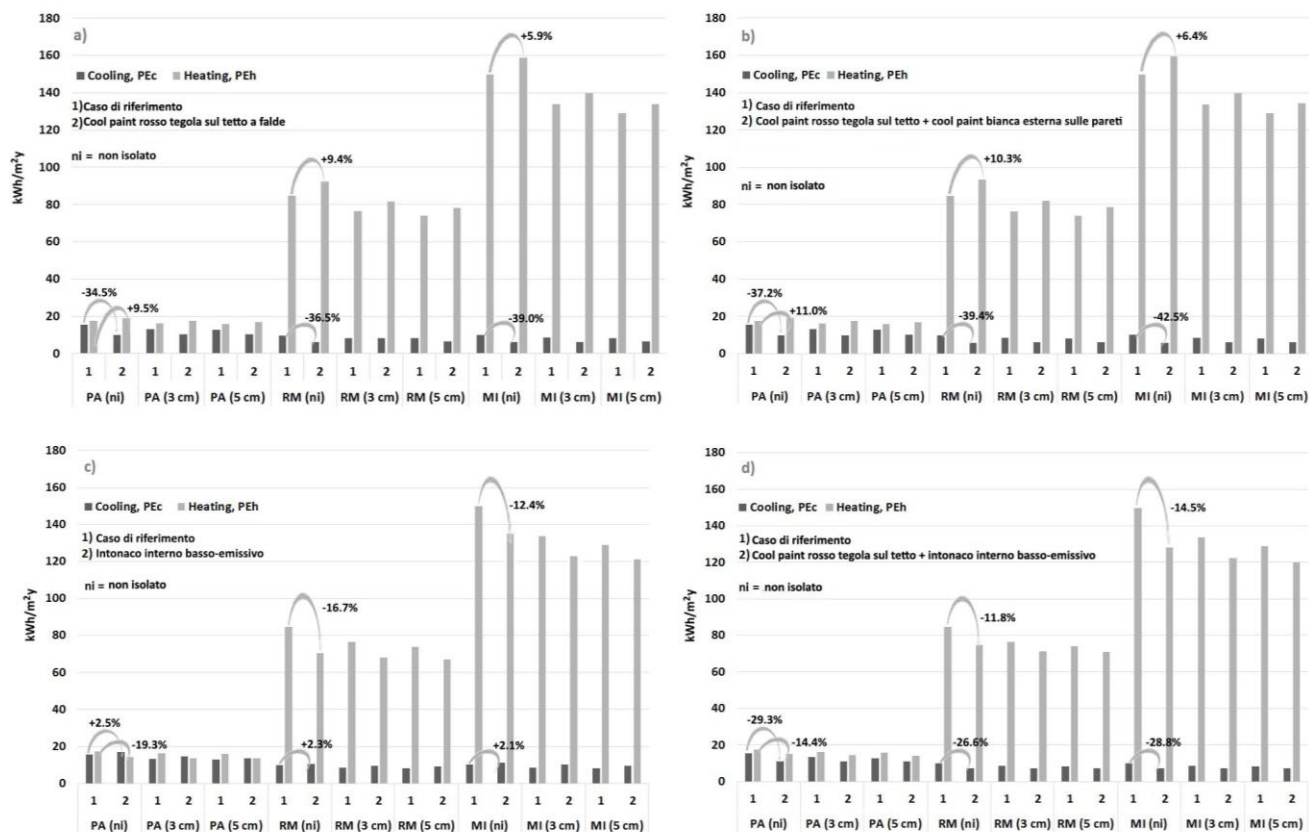


Fig. 5.2.4.2.4: Energia primaria stagionale richiesta al variare delle misure di riqualificazione considerate e del livello di isolamento termico dell'involucro edilizio. PA Palermo, RM Roma, MI Milano

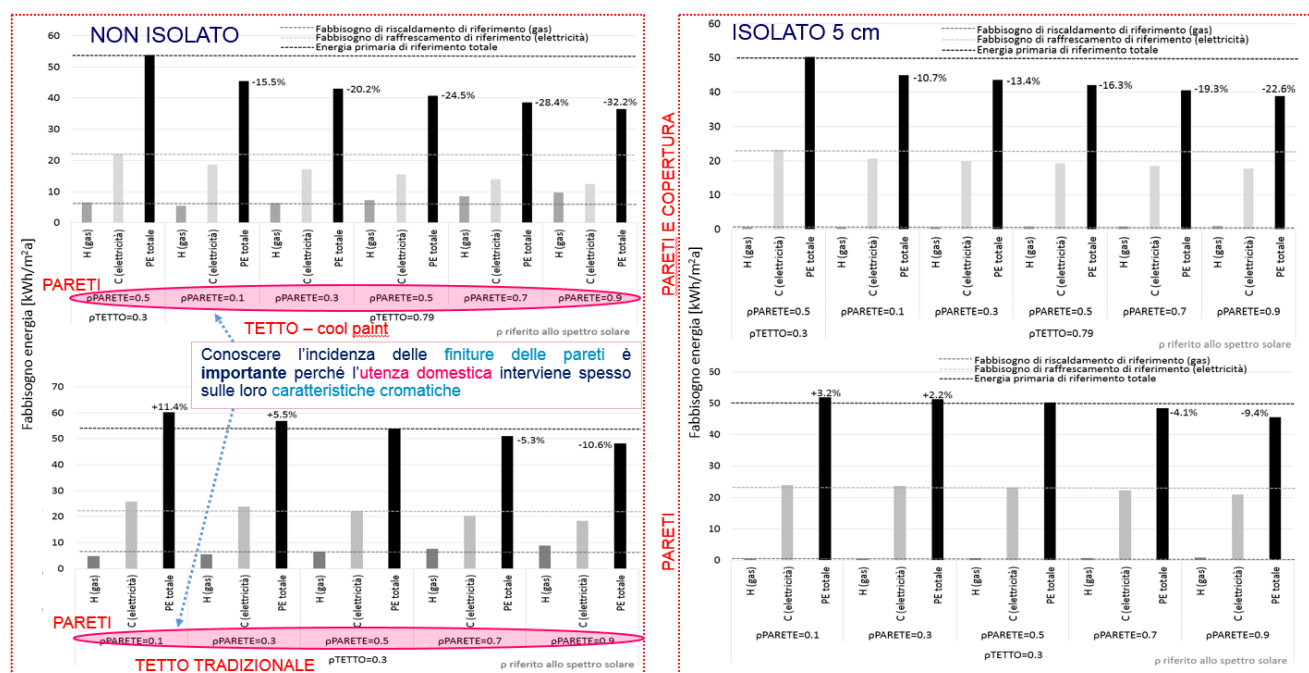


Fig. 5.2.4.2.5: Fabbisogno di energia al variare delle finiture superficiali delle pareti, Palermo

Conoscere l'incidenza delle finiture superficiali delle pareti verticali risulta essere importante perché, usualmente, l'utenza domestica interviene spesso sulle loro caratteristiche cromatiche. Ad esempio per la città di Palermo, la Fig. 5.2.4.2.5 mostra che nel caso di edificio non isolato e $\rho_{\text{sol,pareti}}$ pari a 0.9 (e tetto tradizionale) è possibile avere una riduzione dell'energia primaria globale pari a circa 10.6 %; invece, esaminando il caso non isolato con rivestimenti basso-emissivi ($\rho_{\text{sol,pareti}}$ pari a 0.1) è possibile notare che la domanda energetica primaria aumenta dell'11.4 %.

5.2.4.3 Analisi tecnico-economica

Per valutare la convenienza tecnico-economica degli interventi proposti, sono stati calcolati il tempo di ritorno semplice ed attualizzato (SPB e DB), impiegando tariffe variabili dei vettori energetici gas naturale ed energia elettrica, tratti da Eurostat, 2014 (Fig. 5.2.4.3.1) [106].

I risultati di tipo tecnico-economico mettono in luce che le varie azioni considerate si caratterizzano per una facile installazione ed un costo relativamente basso rispetto alle azioni tradizionali di isolamento termico. La vita utile considerata è pari a 40 anni.

La valutazione tecnico-economica è stata svolta tenendo presente le seguenti componenti: costo di investimento, costo della manodopera, l'utile aziendale del 10 %, le spese generali del 15 % ed i costi di sicurezza del 15 %.

Il costo della vernice rossa sul tetto inclinato è stato valutato pari a circa $5 \text{ €} \cdot \text{m}^2$, mentre l'intonaco innovativo presenta un costo che si aggira intorno ai $5.80 \text{ €} \cdot \text{m}^2$.

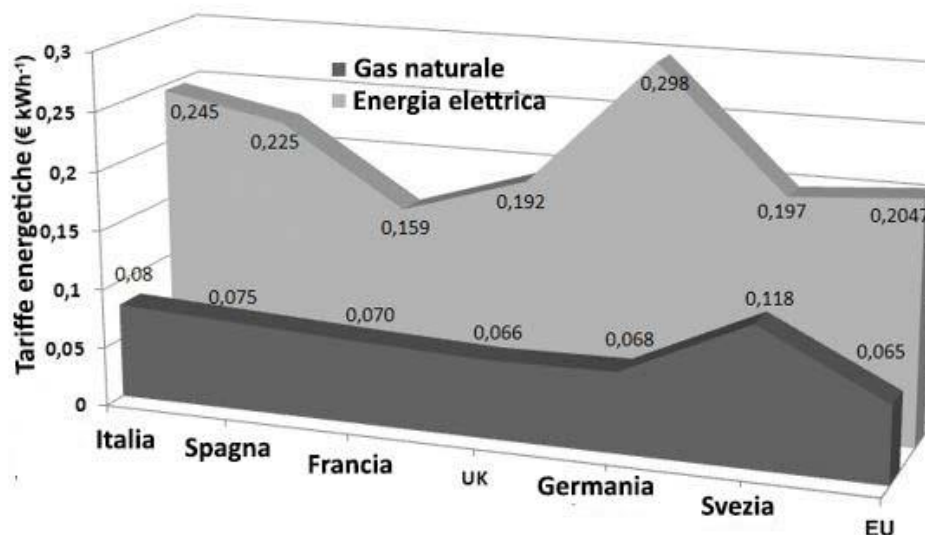


Fig. 5.2.4.3.1: Prezzi dell'energia elettrica e del gas [106]

	Palermo	Siviglia	Roma	Milano	Parigi	Londra	Berlino	Stoccolma
Caso tradizionale	459	691	671	1414	1165	1092	1421	3111
Cool paint rosso tegola esterna	388 (-15.4)	588 (-14.9)	666 (-0.7)	1450 (+2.5)	1181 (+1.4)	1111 (+1.7)	1435 (+0.9)	3120 (+0.3)
Cool paint rosso tegola esterna + cool paint bianca esterna per le pareti	385 (-16.1)	587 (-15.1)	663 (-1.2)	1470 (+3.9)	1184 (+1.6)	1113 (+1.9)	1442 (+1.5)	3125 (+0.5)
Intonaco interno basso-emissivo	372 (-18.9)	574 (-16.9)	577 (-14.0)	1184 (-16.2)	1034 (-11.2)	1024 (-6.2)	1336 (-5.9)	2950 (-5.2)
Cool paint rosso tegola esterna + intonaco interno basso-emissivo	355 (-22.6)	544 (-21.2)	580 (-13.6)	1190 (-15.8)	1044 (-10.4)	1037 (-5.1)	1335 (-6.1)	2970 (-4.5)

Tab. 5.2.4.3.1: Costi annuali di gestione energetica (€) e variazione percentuale delle varie azioni rispetto al caso tradizionale

In questo paragrafo, sono stati valutati:

1. il tempo di ritorno semplice (SPB);
2. il tempo di ritorno attualizzato (DPB).

La Tab. 5.2.4.3.1 riporta i costi annuali di gestione per il riscaldamento e per il raffrescamento, ed indica anche i risparmi percentuali conseguibili con le varie azioni di adeguamento rispetto al caso base di riferimento caratterizzato dalla presenza delle finiture superficiali tradizionali. Si può notare che:

1. i costi energetici per Siviglia sono circa il doppio di quelli per Palermo, perché l'edificio di riferimento di Siviglia presenta caratteristiche termiche molto più carenti;

2. l'attico di Stoccolma presenta valori molto elevati di costi energetici a causa della stagione invernale molto fredda e del relativo prezzo del gas naturale molto più alto rispetto alle altre città (Fig. 5.2.4.3.1);

3. importanti risparmi sui costi energetici si ottengono con tutte le misure di adeguamento (14.9-22.6 %) per climi più caldi (Palermo e Siviglia);

4. le azioni sulle superfici esterne (primo e secondo intervento) sono meno adatte per Roma (diminuzione del costo energetico di circa l'1 %), mentre non sono adatte per le città fredde (aumento del costo energetico del 0.3-3.9 %);

5. la misura all'interno con o senza l'impiego della vernice rossa tegola sul tetto spiovente (terza e quarta azione) porta a risparmi interessanti sui costi energetici (dal 4.5 % al 22.6 %).

Il tempo di ritorno semplice e quello attualizzato (SPB e DPB) sono riportati in Fig. 5.2.4.3.2. In tale figura, alcuni istogrammi sono omessi perché gli interventi presentano valori troppo elevati di ammortamento (principalmente quelli relativi alle azioni 1 e 2 per la città di Roma e le altre località fredde). Per alcune città (Siviglia, Milano e Stoccolma), il SPB non supera i 5 anni, quando si considera l'intervento più adeguato, mentre per le altre città il SPB è compreso tra 5 e 10 anni per Palermo, Roma e Parigi, e tra 10- 15 anni per Londra e Berlino.

Si può notare che i valori di ammortamento di Siviglia sono molto minori rispetto a quelli di Palermo, a causa delle caratteristiche termiche molto scarse dell'involucro edilizio di base. Invece, a Stoccolma il numero di anni in cui è recuperato l'intervento più adeguato è inferiore alle altre città (3 anni nel migliore dei casi), a causa dei costi energetici molto elevati (Tab. 5.2.4.3.1).

Gli indicatori economici sono, ovviamente, migliori quando si considera una detrazione fiscale pari al 35 % dell'investimento considerato (linee in Fig. 5.2.4.3.2). Da tale figura, si può evincere che, in presenza della suddetta detrazione fiscale, il SPB (per la misura più idonea) è compreso tra 3 e 6 anni, ad eccezione di Londra (9 anni). La prima e la seconda azione sono vantaggiose solo per i climi caldi ed in particolar modo per la città di Siviglia.

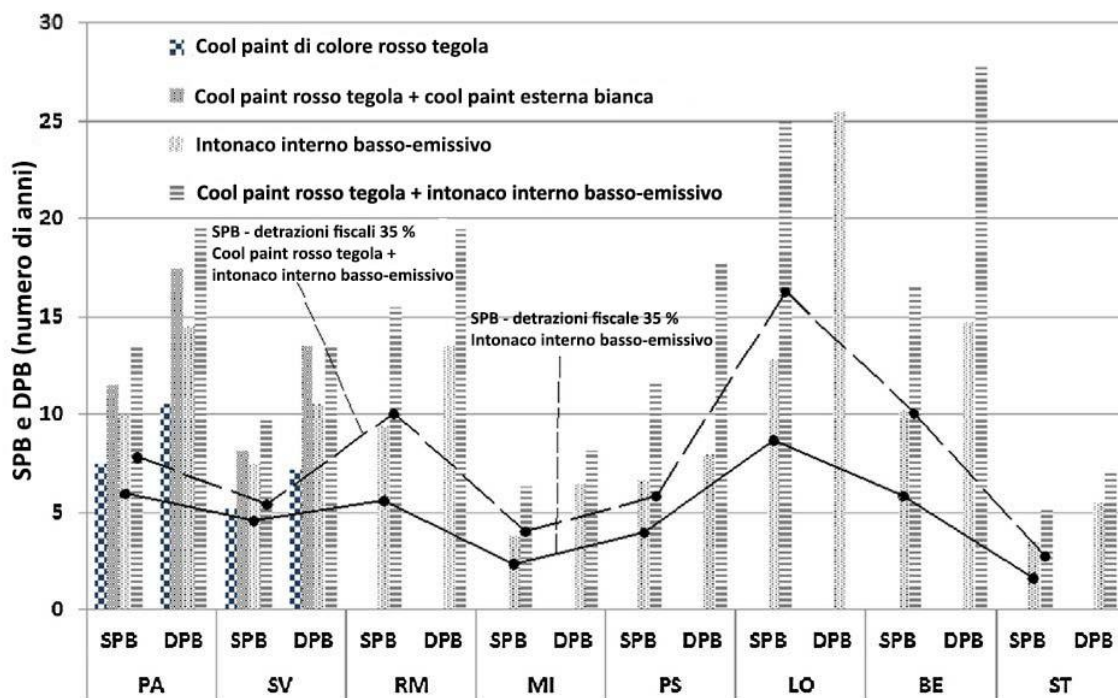


Fig. 5.2.4.3.2: Tempo di ritorno semplice ed attualizzato con e senza detrazioni fiscali del 35%

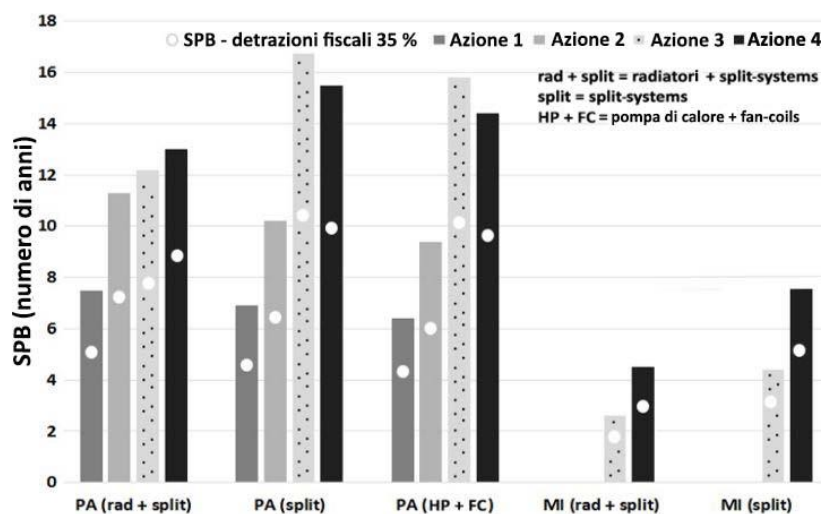


Fig. 5.2.4.3.3: Tempo di ritorno semplice per le quattro azioni di riqualificazione energetica in funzione dell'impianto di riscaldamento/climatizzazione estiva considerato

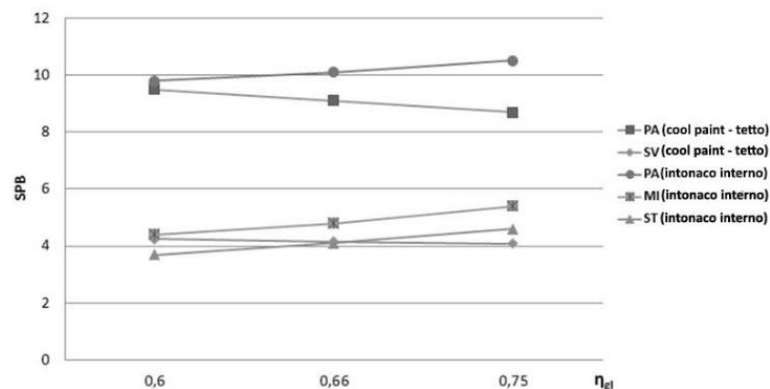


Fig. 5.2.4.3.4: Tempo di ritorno semplice al variare del rendimento globale medio stagionale dell'impianto di riscaldamento

In Fig. 5.2.4.3.3 è riportato il tempo di ritorno semplice delle azioni che risultano essere adeguate nelle città di Palermo e di Milano, al variare dell'impianto di riscaldamento/climatizzazione estiva. A Palermo, l'utilizzo di cool paints sulle superfici esterne (azioni 1 e 2) sono le più idonee (SPB 6.5-11.3 anni); a Milano, invece, è l'azione n. 3 ad essere la più opportuna (intonaco innovativo sulle superfici interne), presentando un SPB molto basso (2.5 anni). Ancora, considerando, le detrazioni fiscali del 35 %, è possibile ottenere dei tempi di ritorno compresi tra 2 e 10 anni.

I periodi di ammortamento sono leggermente influenzati dal valore di efficienza energetica dell'impianto di riscaldamento (Fig. 5.2.4.3.4), mentre l'influenza delle tariffe dell'energia è talvolta più rilevante (Fig. 5.2.4.3.5).

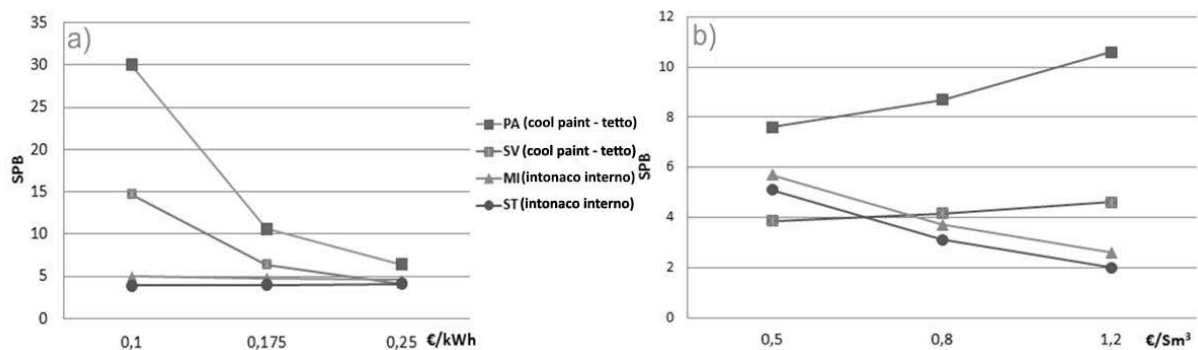


Fig. 5.2.4.3.5: Tempo di ritorno semplice al variare della tariffa energetica

5.2.4.4 Impatto ambientale (in termini di emissioni di CO₂)

La direttiva europea 2010/31/EU richiama gli obiettivi ambientali del Protocollo di Kyoto; in particolar modo si prevede la riduzione delle emissioni di CO₂, entro il 2020, del 20 % rispetto ai livelli del 1990.

Per questo motivo, è stato valutato l'impatto ambientale delle varie azioni proposte (Fig. 5.2.4.4.1).

Per il calcolo delle emissioni di CO₂ annuali, sono stati impiegati i fattori di emissione LCA europei (Life Cycle Assessment) [107], vale a dire 0.708 tCO₂-eq/MWh per l'energia elettrica e 0.237 tCO₂-eq/MWh per il gas naturale. I fattori di emissione LCA hanno il fine di valutare le tonnellate di CO₂ equivalente durante l'intero ciclo di vita di trasformazione energetica, prendendo in considerazione le seguenti fasi:

- estrazione;
- trasporto;
- lavorazione;
- combustione finale.

Si può notare che il fattore di emissione per l'energia elettrica viene applicato all'energia finale erogata; contrariamente, per il gas naturale il fattore di emissione si utilizza, prendendo in esame la richiesta energetica in termini di energia primaria.

La prima azione riduce le emissioni di CO₂, nel range del 34.2 – 51.1 %, solo per le città più calde (Palermo e Siviglia). Nelle altre città, le emissioni aumentano dal 0.3 % all'1.6 %. Tendenze simili sono ottenuti per il secondo intervento di retrofit energetico.

Il terzo e quarto intervento hanno un effetto positivo sulle emissioni per tutte le località. Queste misure mostrano andamenti di emissione molto simili (riduzioni dal 4.9 % al 22.3 % per il terzo caso e dal 4.6 % al 59.8 % per il quarto).

L'estensione delle analisi su una scala territoriale più ampia mette in luce che, ad esempio, prevedendo di applicare l'azione 1, ovvero le cool paint rosso-tegola sul tetto del 25 % di edifici

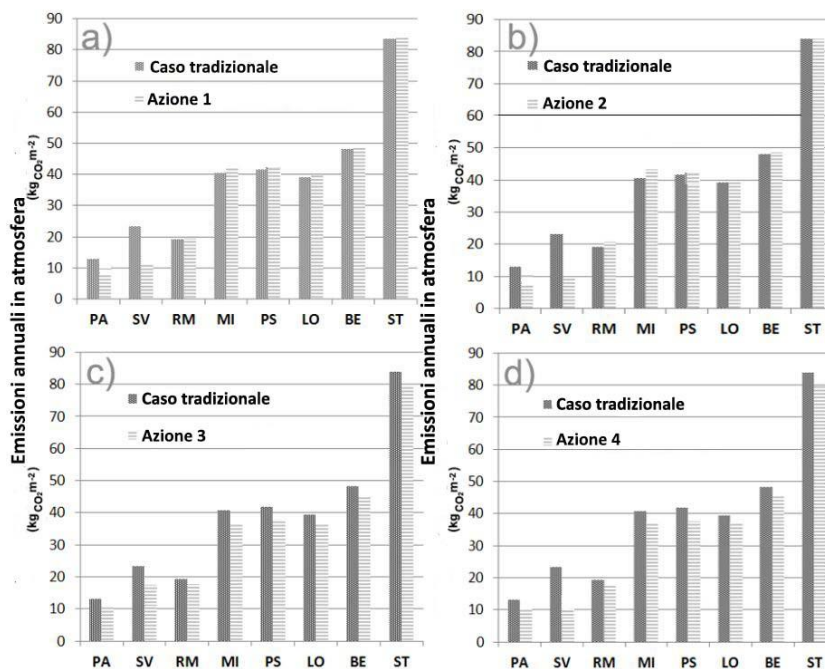


Fig. 5.2.4.4.1: Emissioni di CO₂ in atmosfera in funzione dell'azione di riqualificazione considerata. Azione 1: cool paint rosso tegola sul tetto; azione 2: cool paint rosso tegola sul tetto + cool paint bianca esterna su pareti; azione 3: intonaco interno basso-emissivo; azione 4: cool paint rosso tegola sul tetto + intonaco interno basso-emissivo

presenti al sud Italia con copertura a falde, è possibile conseguire risparmi di energia pari a 915'000 kWh, ossia pari a 290'000 tCO_{2eq}. Il valore delle emissioni evitate in atmosfera equivalgono a circa 2 milioni di auto che percorrono 1000 km di strada (Fig. 5.2.4.4.2).



Fig. 5.2.4.4.2: Estensione dell'intervento 1 (cool paint rosso-tegola) ad un scala territoriale più ampia

5.2.5 Valutazione degli effetti della massa e delle finiture superficiali

In questo paragrafo viene valutato il fabbisogno energetico per il raffrescamento di un edificio tipico residenziale italiano al variare della massa dell'involucro edilizio e delle finiture superficiali. Tale edificio, collocato nella città di Palermo (zona climatica B), è stato oggetto di diverse simulazioni energetiche dinamiche con il fine di analizzare i benefici energetici derivanti dall'utilizzo di tecniche e materiali differenti.

Lo studio, in questo caso, riguarda prettamente la valutazione dei livelli termici superficiali e del fabbisogno energetico estivo relativo a 6 casi di studio (Fig. 5.2.5.1, Tab. 5.2.5.1):

1. CASO 1: involucro verticale leggero;
2. CASO 2: involucro verticale pesante con massa esterna;
3. CASO 3: involucro verticale pesante con massa interna;
4. CASO 4: involucro verticale pesante isolato esternamente;
5. CASO 5: involucro verticale pesante con caratteristiche radiative particolari (identico al caso 3 con finiture superficiali esterne innovative);
6. CASO 6: involucro leggero con caratteristiche radiative particolari (identico al caso 1 con finiture superficiali esterne innovative).

	Spessore (m)	Massa superficiale (kg/m ²)	U (W/m ² K)	ρ_{SOL}	α_{SOL}	ϵ_{INF}
CASO 1	0.33	175	0.375	0.3	0.7	circa 0.90
CASO 2	0.33	320	0.362	0.3	0.7	circa 0.90
CASO 3	0.33	320	0.362	0.3	0.7	circa 0.90
CASO 4	0.33	320	0.362	0.3	0.7	circa 0.90
CASO 5	0.33	320	0.362	0.9	0.1	circa 0.90
CASO 6	0.33	175	0.375	0.9	0.1	circa 0.90

Tab. 5.2.5.1: Massa delle pareti considerate e caratteristiche delle finiture superficiali tradizionali ed innovative proposte

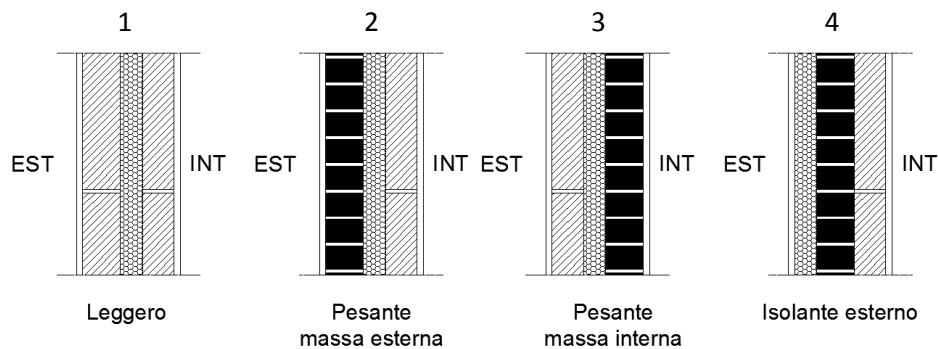


Fig 5.2.5.1: Casi studio analizzati

Nei primi quattro casi studio, l'edificio è stato modellato con le caratteristiche radiative tradizionali dei materiali edili, ossia considerando un fattore α_{sol} pari a circa 0.7 ed un ϵ_{inf} alta pari a 0.9.

I risultati, riportati in Fig. 5.2.5.2, mostrano che:

1. modellando l'involucro edilizio con le stesse caratteristiche termiche e variando soltanto la massa termica dell'involucro edilizio opaco, e conservando lo stesso tasso di ventilazione diurno/notturno e tutte le altre condizioni al contorno non si hanno significative differenze nelle richieste energetiche per il raffrescamento estivo. A tal proposito, risultati simili sono stati riscontrati in [108];
2. modificando le caratteristiche radiative superficiali dei componenti edilizi, è possibile conseguire maggiori risparmi energetici estivi (7.4 %).

Da ciò si evince che l'aumento del fattore di riflessione solare del rivestimento esterno, in clima temperato, è più utile dell'aumento della massa termica.

Nelle ore centrali della giornata, prendendo in esame ad esempio la parete a sud, i componenti edilizi opachi verticali alto riflettenti si caratterizzano per livelli termici inferiori rispetto a quei componenti con basso fattore di riflessione solare. Possiamo notare dalla figura che segue (Fig. 5.2.5.3) una differenza di temperatura pari a circa 14 °C tra il caso 3 ed il caso 6.

Tale fenomeno ha influenza sul flusso di energia termica entrante, provocando una riduzione della temperatura superficiale interna (Fig. 5.2.5.4) nelle ore più calde pari a 1.8 °C (confronto involucro leggero con pesante, caso 1 e caso 3) e pari a 4.4 °C (confronto involucro pesante con involucro pesante/ ρ_{sol} alto, caso 3 e caso 5).

Quindi, in definitiva, si riesce ad ottenere temperature superficiali interne più basse utilizzando finiture superficiali esterne alto-riflettenti che non utilizzando pareti di elevata massa.

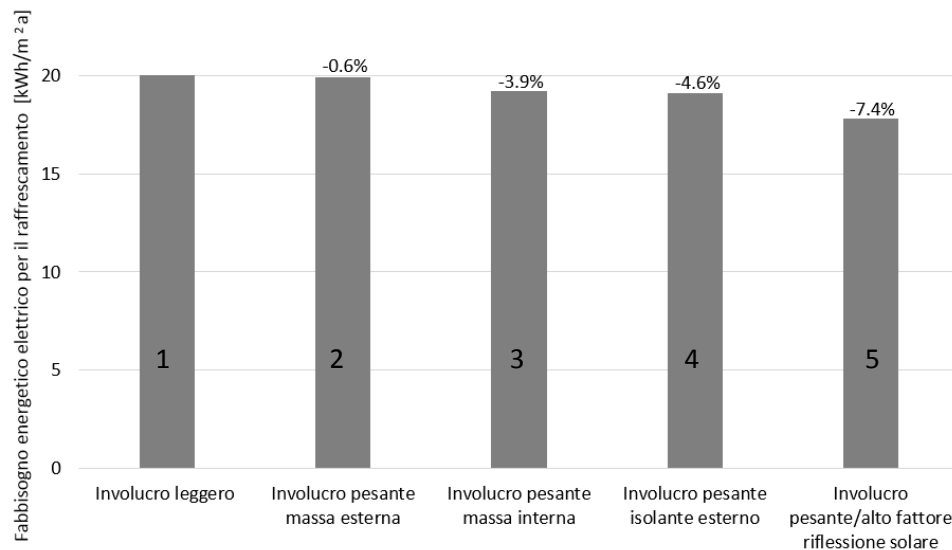


Fig 5.2.5.2: Valutazione del fabbisogno energetico elettrico per il raffrescamento e percentuale di risparmio energetico al variare delle caratteristiche dell'involucro edilizio, per Palermo

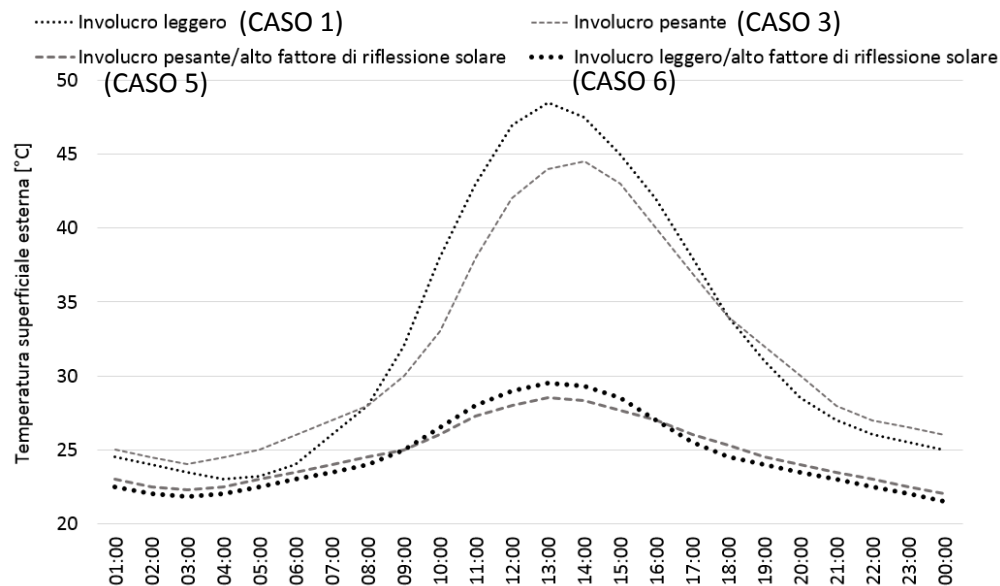


Fig 5.2.5.3: Temperatura superficiale esterna al variare della tipologia di pareti verticali

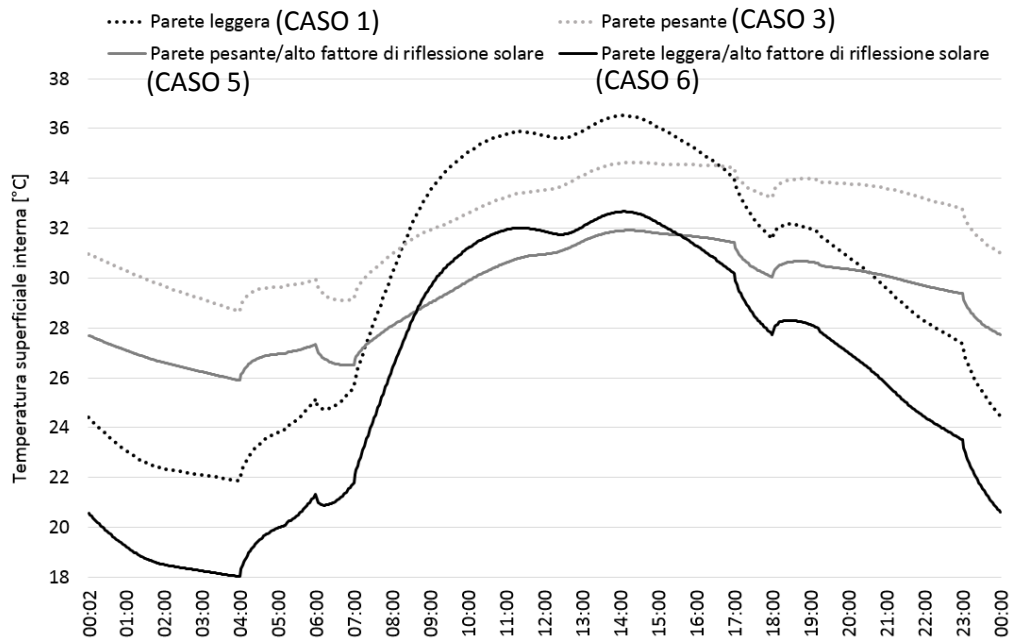


Fig 5.2.5.4: Temperatura superficiale interna al variare della tipologia di pareti verticali

I risultati ottenuti sono strettamente correlati alle condizioni al contorno che sono state definite. Pertanto, cambiando la località climatica, i tassi di ventilazione, le caratteristiche termiche dell'edificio, ecc. si otterrebbero risultati caratterizzati da valori diversi.

Anche nel lavoro [109], si evidenzia che, agendo sul rivestimento esterno dell'involucro edilizio opaco, sono influenzati in modo significativo i carichi termici.

Pertanto, sia le superfici esterne (riflettenti o caratterizzate da un elevato assorbimento solare) delle pareti esposte al sole che quelle delle coperture dovrebbero essere progettate con particolare attenzione, tenendo conto di tutte quelle condizioni al contorno relative al clima ed al luogo ove l'edificio è localizzato, alla destinazione d'uso dell'edificio ed ai requisiti di comfort termico.

Inoltre, occorre precisare che le analisi devono essere svolte sull'intero arco annuale, in quanto come si vedrà successivamente, le finiture superficiali influenzano sia la domanda energetica estiva che quella invernale.

In Italia, le recenti disposizioni in materia di risparmio energetico, come abbiamo visto in precedenza impongono nelle zone climatiche A, B, C, D, E e per tutti gli edifici, eccetto le categorie E.6 ed E.8 del DPR 412/93, caratterizzate da un valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale $\geq 290 \text{ W/m}^2$, nel mese di massima insolazione estiva, il rispetto delle seguenti alternative:

- per le pareti opache verticali (eccetto quelle a nord-ovest/nord/nord-est):
 - massa superficiale $M_s > 230 \text{ kg/m}^2$;
 - trasmittanza termica periodica $Y_{IE} < 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- per le pareti opache orizzontali ed inclinate:
 - trasmittanza termica periodica $Y_{IE} < 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$;

- qualora l'utilizzo di tecniche e materiali innovativi, ad esempio coperture verdi, consentono di contenere le oscillazioni di temperature, è possibile adottarle, attestando l'equivalenza degli effetti alle disposizioni sopra riportate.

Certamente, è apprezzabile la modifica del valore limite $Y_{IElimite}$, da $0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$ (come era previsto nel DPR 50/09, oggi abrogato) a $0.18 \text{ W/m}^2\text{K}$ (come previsto dal decreto Requisiti minimi) [63], ma non è comprensibile perché, nonostante i tetti siano molto più irradiati dei componenti verticali, a causa del fattore doppio di vista con il cielo, la trasmittanza termica dinamica ammessa per i componenti di chiusura superiore orizzontale sia maggiore rispetto a quella delle pareti verticali ($0.18 \gg 0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Tale problema, è ancora più evidente se si studiano le coperture a falde inclinate. Infatti, se l'attenzione si focalizza sugli edifici tipici dei centri storici, o su quelli del parco edilizio prevalente italiano, in particolare sui locali dell'ultimo piano, caratterizzati dalla presenza di tetti a falde rivestiti con tegole di laterizio, è possibile notare che essi sono molto scadenti dal punto di vista energetico, essendo caratterizzati da elevati carichi termici sia invernali che estivi, poiché tali ambienti sono sorti inizialmente con funzioni non residenziali e generalmente presentano strutture di legno con bassa inerzia termica e non isolate; inoltre, la finitura superficiale esterna presenta un fattore di riflessione solare molto basso (inferiore a 0.3-0.4).

Come descritto in precedenza, gli edifici presentano diverse criticità tra cui ridotte altezze e superfici abitabili (quest'ultima correlata all'altezza minima dell'abitazione); pertanto, diviene necessario individuare azioni alternative al classico isolamento termico dall'interno per non indurre ulteriori riduzioni della superficie abitabile.

Un altro punto che induce a soffermarsi sulle coperture a falde è posto dai dati CRESME, sopradescritti.

Come visto, complessivamente circa il 70 % degli edifici presenta una copertura a falde inclinate e circa il 30% una copertura piana, suddivisi in:

1. copertura a falde con sottotetto non abitabile (46 %);
2. copertura a falde inclinate con sottotetto abitabile (23 %);
3. coperture piane, in maggioranza praticabili (32 %).

Il mercato potenziale di riqualificazione, nell'arco temporale 2014-2023, è suddiviso nel modo seguente:

1. 1554 milioni di m^2 di superfici da isolare, comprendente il nuovo ed il ristrutturato, composti da:
 - 474 milioni di m^2 di pareti verticali;
 - 813 milioni di m^2 di coperture;
 - 267 milioni di m^2 di solai e sottotetti.
2. considerando soltanto l'esistente, il potenziale è costituito da 967 milioni di m^2 (96.7 milioni di m^2 annui):
 - 217 milioni di m^2 di pareti verticali;
 - 691 milioni di m^2 di coperture;
 - 59 milioni di m^2 di solai e sottotetti.

Da ciò si evince che a causa delle pessime performances energetiche e dalle potenzialità scaturite dalla riqualificazione dei tetti a falde, ossia dall'alto valore delle superfici delle

coperture a falde presenti sul nostro territorio, deriva l'importanza di intervenire su queste unità ambientali.

Pertanto, tenendo conto anche delle condizioni di esercizio più critiche per quanto riguarda gli ambienti dell'ultimo piano esposti a radiazione solare, è abbastanza strano che la legge ammette valori più alti della trasmittanza termica periodica per le coperture.

Come svolto precedentemente per i componenti verticali, anche per i tetti vengono valutati i livelli termici superficiali e le richieste energetiche, considerando differenti soluzioni di coperture a falda.

Lo studio, in questo caso, riguarda prettamente la valutazione dei livelli termici superficiali e del fabbisogno energetico estivo relativo a 4 casi di studio:


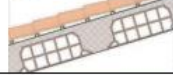





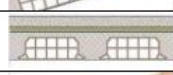



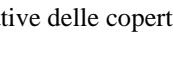
CASO 1: tetto leggero (struttura e tavolato in legno, caso 1 di Tab. 5.2.5.2) ;

CASO 2: tetto pesante (struttura in latero-cemento, caso 2 di Tab. 5.2.5.2);

CASO 3: tetto leggero con caratteristiche radiative particolari;

CASO 4: tetto pesante con caratteristiche radiative particolari.

Le caratteristiche termiche sono riportate in Tab. 5.2.5.3.

CHIUSURA OPACA SUPERIORE (Copertura)	DESCRIZIONE	IMMAGINE	PERIODO DI MAGGIORE DIFFUSIONE		U [W/(m ² K)]
	Tetto a falde con struttura e tavolato in legno		-	1950	1,80
	Tetto a falde in laterizio		1930	1975	2,20
	Tetto piano in latero-cemento		1930	1975	1,85
	Tetto a falde con struttura e tavolato in legno, basso livello di isolamento		1976	1990	0,95
	Tetto a falde in laterizio, basso livello di isolamento		1976	1990	1,14
	Tetto piano in latero-cemento, basso livello di isolamento		1976	1990	1,01
	Tetto a falde con struttura e tavolato in legno, medio livello di isolamento		1991	2005	0,64
	Tetto a falde in laterizio, medio livello di isolamento		1991	2005	0,74
	Tetto piano in latero-cemento, medio livello di isolamento		1991	2005	0,70
	Tetto a falde con struttura e tavolato in legno, alto livello di isolamento		2006	-	0,30
	Tetto a falde in laterizio, alto livello di isolamento		2006	-	0,30
	Tetto piano in latero-cemento, alto livello di isolamento		2006	-	0,30

Tab. 5.2.5.2: Tipologie costruttive delle coperture [54]

	Spessore (m)	Massa (kg/m ²)	U (W/m ² K)	ρ_{SOL}	α_{SOL}	ϵ_{INF}
CASO 1	0.15	180	1.80	0.3	0.7	circa 0.90
CASO 2	0.20	315	2.20	0.3	0.7	circa 0.90
CASO 3	0.15	180	1.80	0.79	0.21	circa 0.90
CASO 4	0.20	315	2.20	0.79	0.21	circa 0.90

Tab. 5.2.5.3: Massa per unità di superficie e caratteristiche delle finiture superficiali tradizionali ed innovative proposte

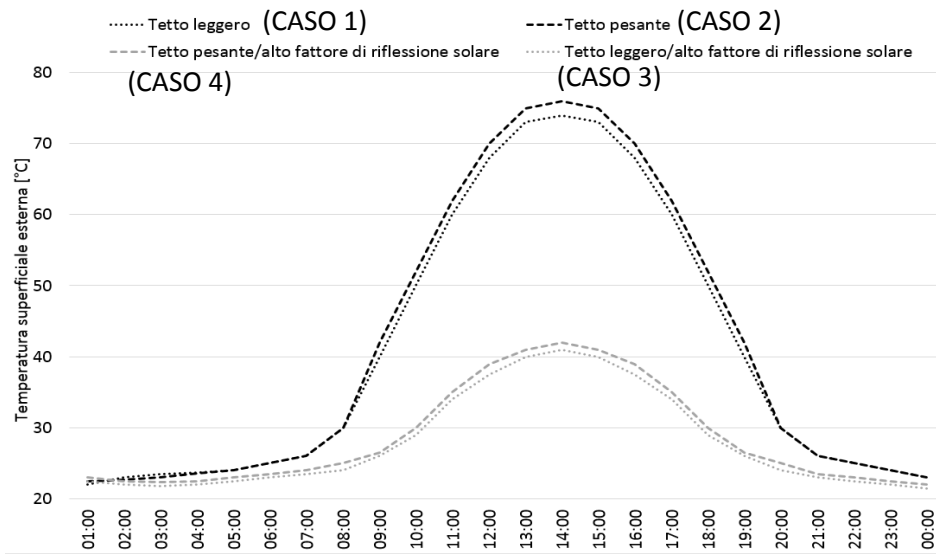


Fig. 5.2.5.5: Temperatura superficiale esterna al variare della tipologia di copertura a falde inclinate

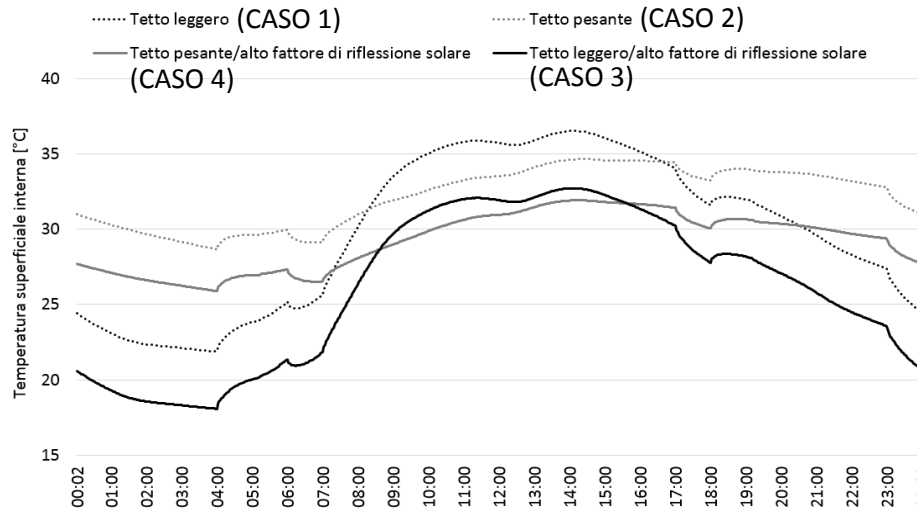


Fig. 5.2.5.6: Temperatura superficiale interna al variare della tipologia di copertura a falde inclinate

Nei primi due casi di studio (n. 1 e 2), l'edificio è stato modellato con le caratteristiche radiative tradizionali dei materiali edili; ossia considerando un fattore α_{sol} pari a circa 0.7 ed un ϵ_{inf} alta pari a 0.9, mentre gli ultimi due casi (n. 3 e 4) presentano un rivestimento superficiale esterno con un alto fattore di riflessione solare.

I risultati, riportati nelle Fig. 5.2.5.5 – 5.2.5.6 mostrano che:

1. modellando l'involucro edilizio con le stesse caratteristiche termiche e variando soltanto la massa termica dell'involucro edilizio opaco, e conservando lo stesso tasso di ventilazione diurno/notturno e tutte le altre condizioni al contorno non si hanno significative differenze nelle richieste energetiche per il raffrescamento estivo;
2. modificando le caratteristiche radiative superficiali dei componenti edilizi è possibile conseguire elevati risparmi energetici estivi (circa 31-32 %), come si può notare dalla Fig 5.2.5.7.

Da questo si evince che, come visto già per le pareti verticali, l'aumento del fattore di riflessione solare del rivestimento esterno, nelle località con clima temperato, è più utile dell'aumento della massa termica.

Nelle ore centrali della giornata, la copertura a falda con finitura superficiale alto riflettente è caratterizzata da livelli termici inferiori (valori massimi pari a 42 °C) rispetto allo stesso componente opaco con caratteristiche radiative tradizionali (alto fattore di assorbimento solare, temperature anche superiori a 70 °C). Possiamo notare dalla Fig. 5.2.5.5 una differenza di temperatura superficiale esterna pari a circa 35 °C.

Tale fenomeno ha influenza sul flusso di energia termica entrante, provocando una riduzione della temperatura superficiale interna (Fig. 5.2.5.6) nelle ore più calde pari a circa 2 °C (confronto tetto leggero con pesante, caso 1 e caso 2) e pari a circa 4 °C (confronto tetto leggero con tetto leggero/ ρ_{sol} alto, caso 1 e caso 3).

Inoltre, confrontando il tetto pesante, che presenta valori di trasmittanza termica periodica nei limiti previsti dalla legislazione italiana ($<0.18 \text{ W/m}^2\text{K}$), con il tetto leggero con cool paint sulle tegole, è possibile notare che la temperatura superficiale interna, nelle ore di massima insolazione è superiore di 2.5/2.95 °C rispetto al secondo caso (tetto leggero/ ρ_{sol} alto), che però paradossalmente non è in linea con la normativa energetica.

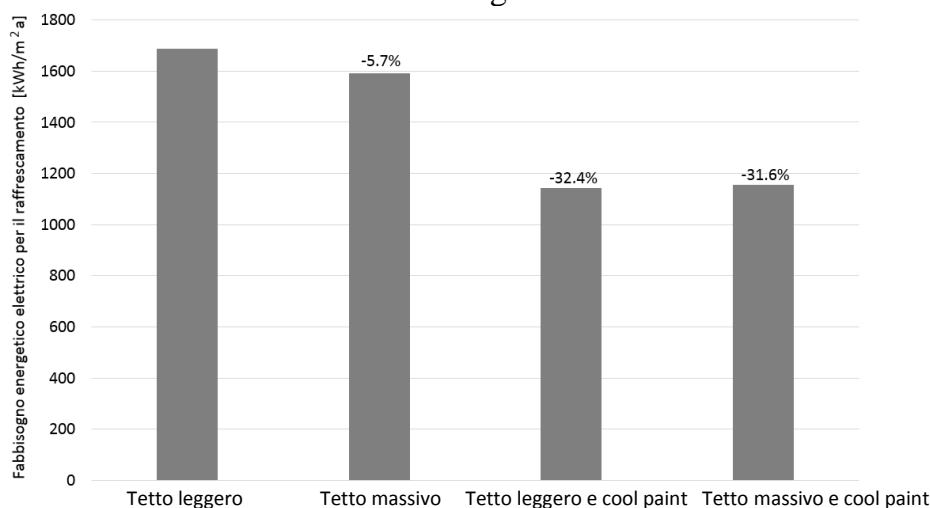


Fig. 5.2.5.7: Valutazione del fabbisogno energetico elettrico per il raffrescamento e percentuale di risparmio energetico

5.2.6 Valutazione dei livelli termici al variare delle caratteristiche termiche dell'involucro edilizio e delle caratteristiche radiative delle finiture superficiali

In questo paragrafo, si riportano i dati di output ottenuti, considerando diverse finiture superficiali esterne, relativi ai valori di:

1. temperatura dell'aria interna;
2. temperatura media radiante;
3. temperatura operativa.

La temperatura operativa (Eq. 5.10, 5.12), viene spesso utilizzata per valutare le condizioni climatiche negli ambienti confinati. La norma ISO 7730 [110] definisce la temperatura operativa come la temperatura uniforme di una cavità in cui il soggetto scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa energia che effettivamente scambia nell'ambiente reale non uniforme. Dipende, quindi, dagli scambi radiativi e convettivi e viene calcolata con la relazione:

$$t_o = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_r + h_c} \quad (5.10)$$

in cui h_c e h_r sono rispettivamente la conduttanza termica unitaria convettiva e radiativa e t_r e t_a sono la temperatura radiante e la temperatura ambiente.

Poiché si incontrano delle difficoltà nel valutare le due conduttanze termiche unitarie, si può procedere con due espressioni semplificate per il calcolo della temperatura operativa, da applicarsi quando la velocità relativa dell'aria è bassa (< 0.2 m/s), Tab. 5.2.6.1 o quando la differenza tra la temperatura media radiante e la temperatura dell'aria è piccola (< 4 °C).

$$t_o = A t_a + (1 - A) \bar{t}_r \quad (5.11)$$

Velocità relativa dell'aria (m/s)	Coefficiente A
<0.2	0.5
0.2 – 0.6	0.6
0.6 – 1.0	0.7

Tab. 5.2.6.1: Valori del coefficiente A per il calcolo della temperatura operativa

L'ultima espressione è una semplice media aritmetica dei valori delle due temperature dalle quali la temperatura operativa dipende:

$$t_o = \frac{t_a + \bar{t}_r}{2} \quad (5.12)$$

Nella Tab. 5.2.6.2 seguente, si riportano le principali caratteristiche superficiali dei componenti edilizi considerati. Si precisa che, in particolare, il caso numero 2 è prettamente teorico (finiture con alto fattore di assorbimento solare pari a 0.9, finitura scura di rado

impiegata), ma importante per mettere in evidenza le carenti prestazioni, in regime estivo, dell'involucro isolato in modo tradizionale.

	Coating surface	ρ_{SOL}	α_{SOL}	ϵ_{INF}
CASO 1 TRADIZIONALE NON ISOLATO	Intonaco tradizionale di colore medio	0.5	0.5	circa 0.90
	Tegole di laterizio tradizionale	0.3-0.4	0.6-0.7	circa 0.90
CASO 2 TRADIZIONALE NON ISOLATO + FINITURE ESTERNA CON $\alpha_{sol}=0.9$	Intonaco	0.1	0.9	0.90
	Tetto	0.1	0.9	0.90
CASO 3 TRADIZIONALE NON ISOLATO + FINITURE ESTERNA CON $\alpha_{sol}=0.7$	Intonaco	0.3	0.7	0.90
	Tetto	0.3	0.7	0.90
CASO 4 TRADIZIONALE NON ISOLATO + FINITURE ESTERNA CON $\alpha_{sol}=0.5$	Intonaco	0.5	0.5	0.90
	Tetto	0.5	0.5	0.90
CASO 5 TRADIZIONALE NON ISOLATO + FINITURE ESTERNA CON $\alpha_{sol}=0.3$	Intonaco	0.7	0.3	0.90
	Tetto	0.7	0.3	0.90
CASO 6 TRADIZIONALE ISOLATO (5 cm)	Intonaco tradizionale di colore medio	0.5	0.5	circa 0.90
	Tegole di laterizio tradizionale	0.3-0.4	0.6-0.7	circa 0.90
CASO 7 TRADIZIONALE NON ISOLATO + FINITURE SUPERFICIALI INNOVATIVE	Intonaco innovativo	0.88	0.12	circa 0.90
	Vernice fresca color tegola	0.79	0.21	circa 0.90
CASO 8 TRADIZIONALE ISOLATO + FINITURE SUPERFICIALI INNOVATIVE	Intonaco innovativo	0.88	0.12	circa 0.90
	Vernice fresca color tegola	0.79	0.21	circa 0.90

Tab. 5.2.6.2: Caratteristiche spettrali considerate per la finitura superficiale dell'involucro edilizio

Le simulazioni energetiche dinamiche, condotte per la città di Palermo, presentano differenti configurazioni:

1. *Naturally ventilated building (No_HVAC)*: ovvero sono analizzati i profili di temperatura degli spazi confinati con l'impianto disattivato in modo da poter valutare l'effettiva capacità dei materiali studiati di migliorare il microclima interno;
2. *Air-conditioned building (HVAC)*: ossia il fabbisogno energetico viene valutato considerando un regime di funzionamento ordinario dell'impianto secondo quanto stabilito dal DPR 412/93 [103].

Inoltre, è stato valutato il comfort termico adattativo (simulazioni con impianto spento).

Le analisi seguenti sono state condotte, prendendo in esame una settimana tipica estiva (27 luglio – 2 agosto), e rappresentano i valori della temperatura dell'aria interna, della temperatura media radiante e della temperatura operativa (Fig. 5.2.6.1 – 5.2.6.3), con impianto HVAC disattivato, in funzione della tipologia dell'involucro edilizio opaco considerato.

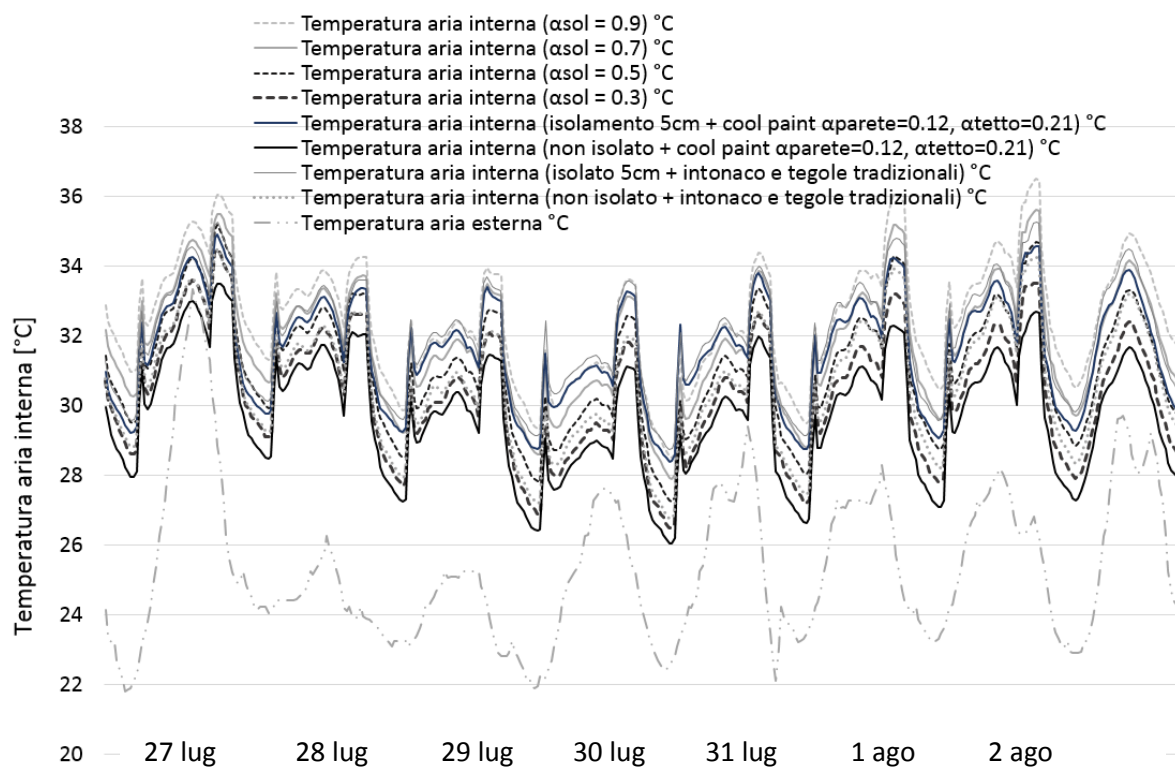


Fig. 5.2.6.1: Profili della temperatura dell'aria interna, settimana tipica estiva

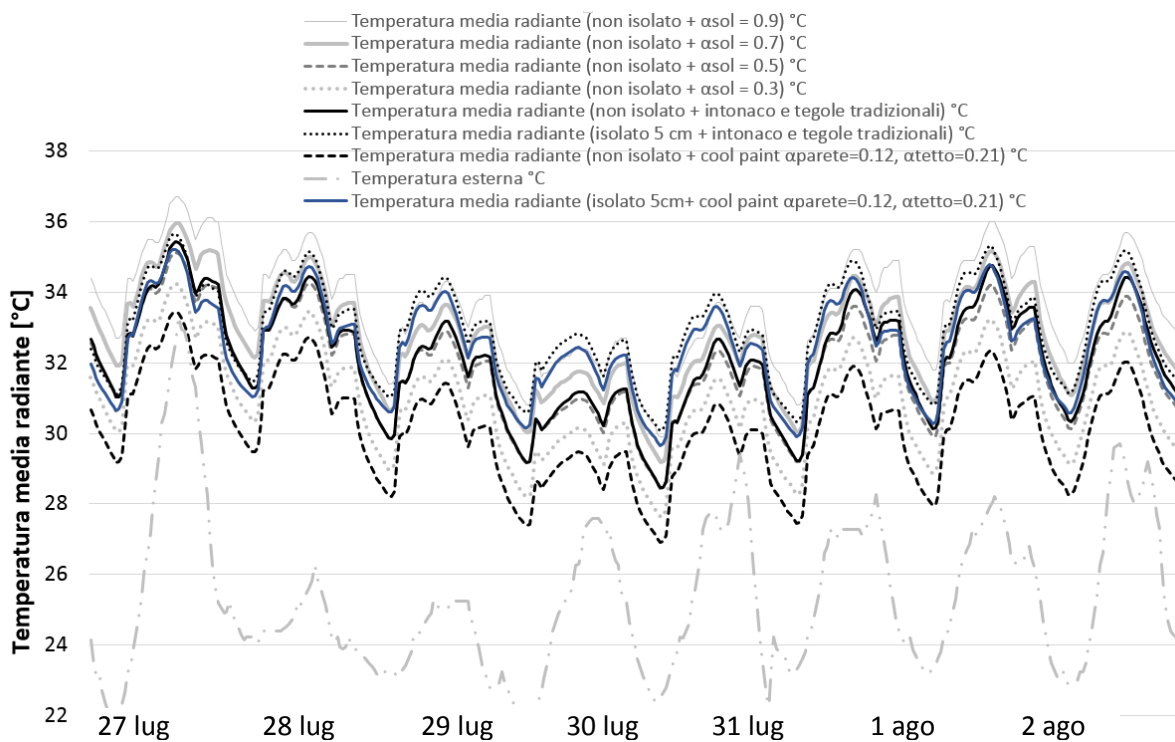


Fig. 5.2.6.2: Profili della temperatura media radiante, settimana tipica estiva

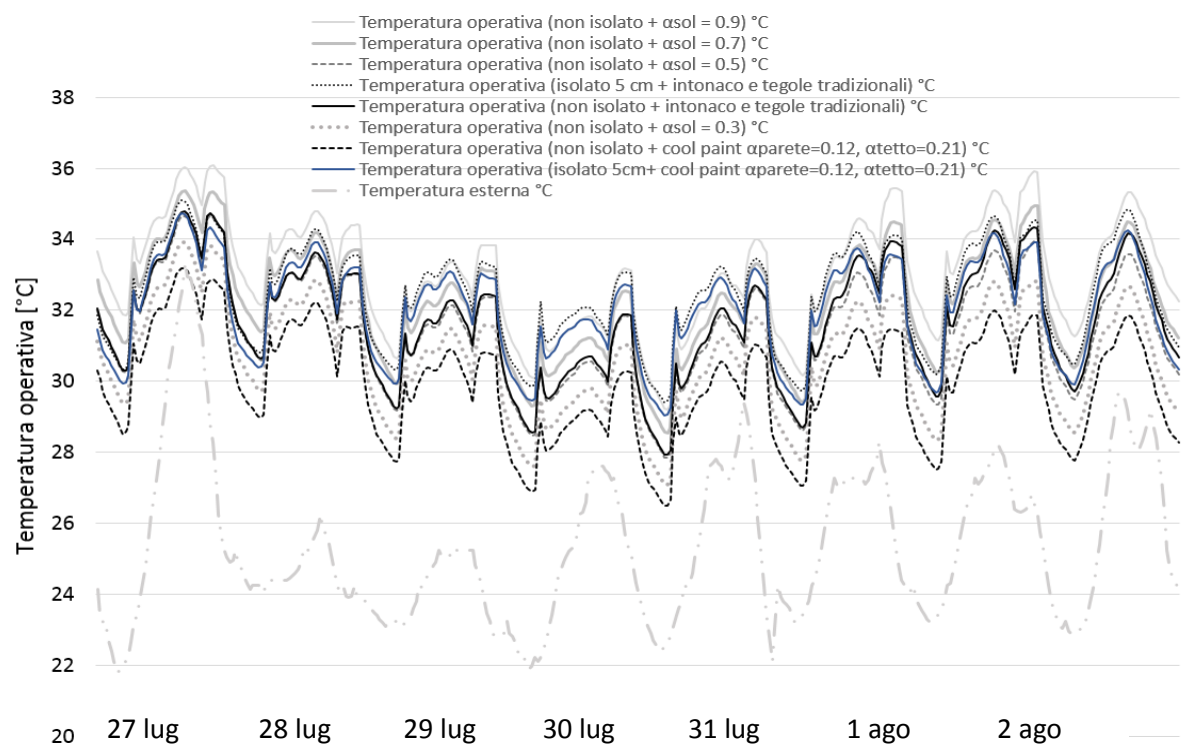


Fig. 5.2.6.3: Profili della temperatura operativa, settimana tipica estiva

Tale attività mette in evidenza che un involucro edilizio opaco che a parità di tutte le altre condizioni, che presenta un alto fattore $\alpha_{SOL} = 0.9$ è caratterizzato da pessime prestazioni energetiche estive, in quanto i parametri analizzati (temperatura dell'aria interna, temperatura media radiante e temperatura operativa) hanno valori molto più alti rispetto a tutti gli altri casi. Ancora, si può notare che l'involucro edilizio isolato in modo tradizionale con fibre di legno dello spessore di 5 cm presenta performances energetiche molto simili al caso peggiore ($\alpha_{SOL} = 0.9$).

Come si può notare successivamente, nella Fig. 5.2.6.4 viene mostrata una comparazione tra 2 edifici (con $WWR = 20\%$, dove WWR sta per Window-to-Wall Ratio) aventi le caratteristiche del caso 6 (isolamento termico tradizionale), del caso 7 (non isolato con vernici termoriflettenti) e del caso 8 (isolato tradizionale con vernici termoriflettenti) riportate in Tab. 5.2.6.2.

Da questa figura si evince che, in assenza di impianto di raffrescamento, la soluzione che consente di ottenere un maggior beneficio sui profili di temperatura dell'aria interna, della temperatura media radiante e della temperatura operativa è il caso che riguarda le vernici innovative studiate in questo lavoro di tesi.

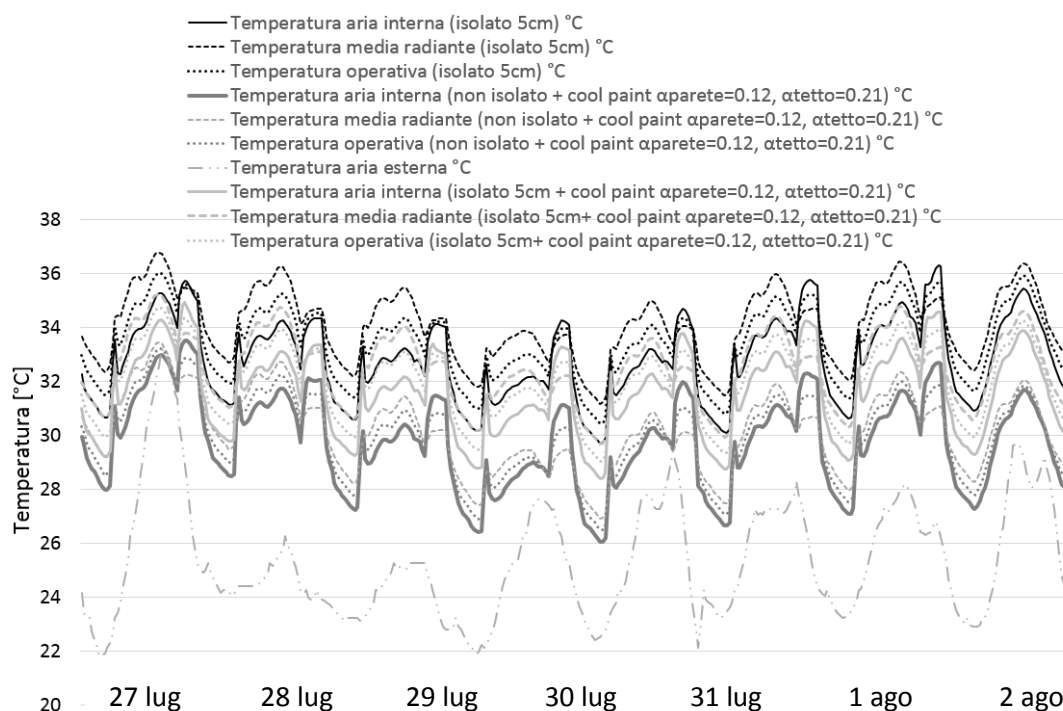


Fig. 5.2.6.4: Confronto dei profili di temperatura dell'aria, media radiante ed operativa nei casi 1) isolante tradizionale; 2) non isolato con vernici termoriflettenti; 3) isolante tradizionale + vernici termoriflettenti

Esaminando in dettaglio la Fig. 5.2.6.5, in particolare, ponendo l'attenzione, ad esempio, al giorno 3 agosto, notiamo che la temperatura media radiante, nel caso 6 (involucro isolato con fibre di legno dello spessore di 5 cm), varia tra 32.4 °C e 36.38 °C; mentre, il caso migliore, ossia il caso 7 caratterizzato dalla presenza delle finiture superficiali innovative (involucro non isolato con cool paints sia sulle superfici esterne del tetto che delle pareti), la temperatura media radiante è variabile tra 27.77 °C e 31.85 °C. Pertanto, l'impiego di cool paints consente di ridurre il valore della temperatura media radiante di circa 4.5 °C (-12.5 %).

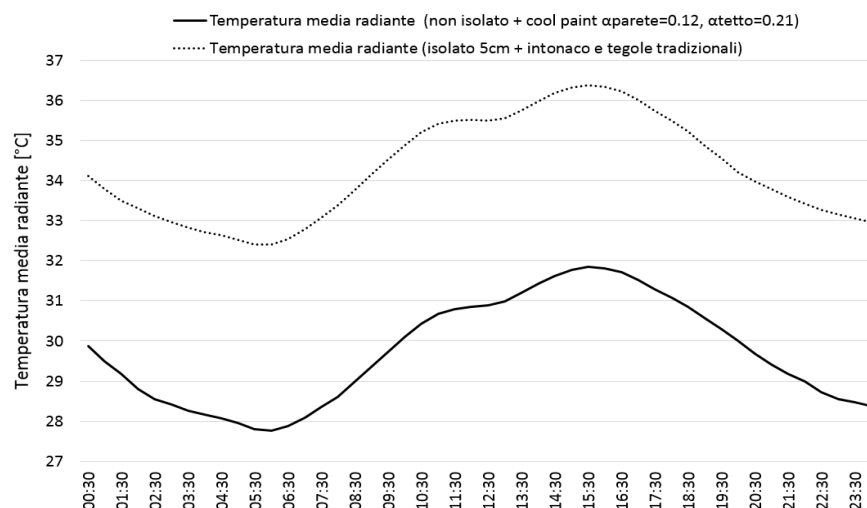


Fig. 5.2.6.5: Confronto dei profili della temperatura media radiante nei casi 1) isolante tradizionale; 2) non isolato con vernici termoriflettenti

Nella Fig. 5.2.6.6, si riporta il profilo della temperatura interna dell'aria, nel caso tradizionale, in funzione del tasso di ventilazione naturale. Si può notare che, nel caso di un edificio tradizionale, facendo variare tale tasso di ventilazione da 0.3 vol/h a 1 vol/h i profili di temperatura si discostano di molto poco (da un minimo di 0.1 °C ad un massimo pari a 1.1 °C).

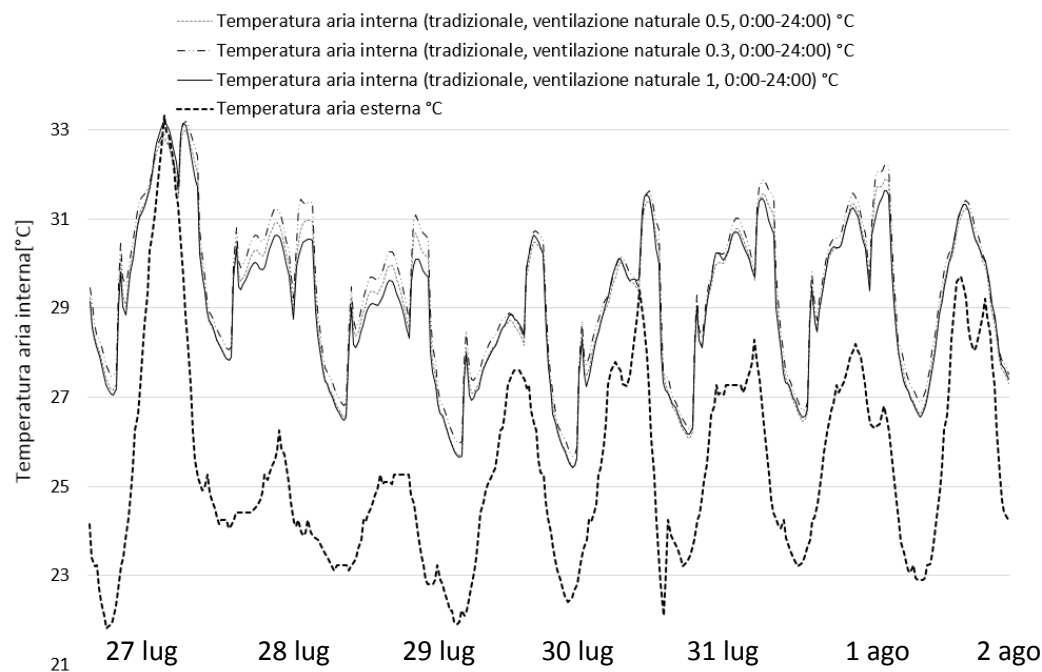


Fig. 5.2.6.6: Confronto dei profili della temperatura dell'aria interna 1) 0.3 vol/h; 2) 0.5 vol/h; 3) 1 vol/h

In dettaglio (Tab. 5.2.6.3), prendendo sempre in esame il giorno 3 agosto alle ore 15:00, notiamo che rispetto al caso 1 (tradizionale non isolato), il caso 7 (vernici innovative sulle superfici esterne dell'involucro edilizio opaco) consente di ridurre la temperatura dell'aria interna di 1.53 °C (pari al -4.61 %); invece, il caso 6 (isolamento tradizionale), sempre rispetto al caso 1 induce un incremento della temperatura dell'aria interna di circa 1.30 °C (pari a +3.9 %).

Inoltre, si può evincere che il caso 6 (isolamento tradizionale) è quello che presenta risultati più prossimi al caso "teorico" peggiore, ossia il caso n° 2 (temperatura aria interna pari a 34.49 °C, -1.29 %) (Tab. 5.2.6.3).

3 agosto ore 15 – T. interna	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6	CASO 7	CASO 8	Temperatura aria esterna
	33.2	34.94	34.15	33.29	32.4	34.49	31.67	33.89	29.20
Δ% rispetto CASO 1		5.24	2.86	0.27	-2.41	3.88	-4.61	2.08	
Δ% rispetto CASO 2	-4.98		-2.26	-4.72	-7.27	-1.29	-9.36	-3.00	

Tab.5.2.6.3: Valori della temperatura interna ed esterna

La Fig. 5.2.6.7 mostra i profili di temperatura durante una giornata tipica estiva caratterizzata dall'accensione dell'impianto alle ore 10:00 fino alle ore 22:00.

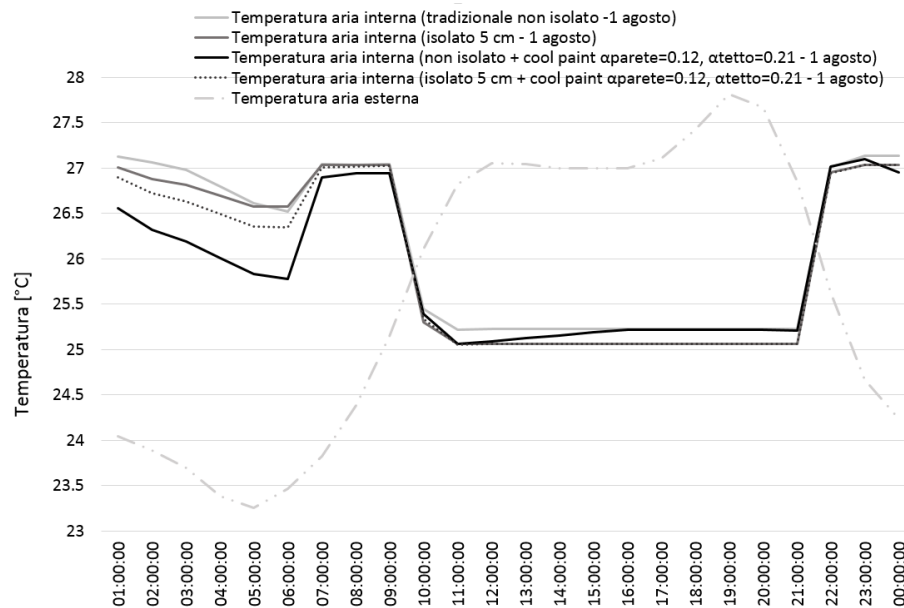


Fig 5.2.6.7: Profili di temperatura con impianto attivo 10:00-22:00

5.2.7 Valutazione delle condizioni di comfort adattivo

Se non si presta la dovuta attenzione, può capitare che gli edifici ad alta efficienza energetica trascurino altri aspetti di notevole importanza per la progettazione edilizia, se non addirittura la principale funzione dell'edificio, ossia quella di realizzare all'interno degli spazi confinati condizioni di comfort ambientale.

Occorre tenere presente che l'energia è un mezzo per conseguire condizioni di benessere all'interno degli spazi abitati; pertanto, il fine principale non può trasformarsi soltanto in una minimizzazione della domanda energetica a discapito del comfort termo-igrometrico delle persone all'interno degli ambienti, ma deve essere sempre quello di protezione degli utenti dalle condizioni climatiche esterne con il minore impiego di risorse energetiche possibili.

Nel Sud Europa, dove sono presenti sia inverni rigidi che estati calde, vi è, in particolare modo, la necessità di creare condizioni di confortevoli in regime estivo. La norma EN 15251 [96] distingue 2 casi principali di comfort accettabile:

1. con sistemi attivi di climatizzazione estiva: si fa riferimento al modello di Fanger o definito anche del Predicted Mean Vote (PMV);
2. con sistemi passivi di climatizzazione estiva: si fa riferimento al modello Adattivo, ossia alla capacità degli occupanti di adattarsi al clima prevalente degli spazi confinati.

Questi modelli di comfort consentono di descrivere in modo quantitativo il range di comfort avvertito da un ampio gruppo di persone.

Nel modello di Fanger, le condizioni interne ottimali sono correlate alle condizioni di temperatura interna dell'aria, temperatura media radiante, velocità dell'aria, umidità relativa, all'attività svolta negli ambienti ed al vestiario degli occupanti.

Il modello Adattivo relaziona la temperatura di comfort per gli occupanti con quella esterna e si fonda sul concetto di adattamento del corpo umano (impressione soggettiva di comfort all'interno di centinaia di edifici) al clima locale e stagionale. In tal modo, gli occupanti considerano confortevoli delle differenti temperature, rispetto alle condizioni usuali, in funzione sia della stagione che della località.

Il modello di Fanger considera un range ristretto di temperature confortevoli; mentre, il modello Adattivo prende in esame un range molto più ampio, permettendo una più agevole integrazione e valutazione delle strategie passive, in quanto definisce temperature di comfort più alte e più flessibili.

Nel modello Adattivo, le temperature massime ammesse sono abbastanza alte. Infatti, ad esempio l'analisi, svolta per le città di Palermo e Roma, mette in mostra che l'algoritmo adattivo, definito dalla norma sopra citata, prevede delle temperature di comfort massime nei giorni estivi pari a 29.4 °C per Palermo e pari a 28.7 °C per Roma.

In anni recenti, la normativa internazionale (ASHRAE 55 2004 ed EN 15251) ha proposto modelli adattivi basati su sondaggi relativi al comfort di edifici reali.

Spesso la temperatura di comfort neutra nel modello adattivo si può raggiungere, impiegando adeguate strategie passive, ad esempio mediante un'opportuna schermatura della radiazione solare, degli opportuni materiali ed un'adeguata ventilazione naturale. In alcuni casi, dunque, il fabbisogno di raffrescamento si riduce praticamente a zero e diviene non necessario un impianto di raffrescamento estivo.

In climi caldi, come nel caso di Palermo, la ventilazione notturna non consente di trovarci completamente nella zona di comfort, per cui è necessario climatizzare gli ambienti pur impiegando strategie passive opportune.

Aspetti negativi sono legati alla questione che in città potrebbe risultare non efficace la ventilazione naturale, in quanto l'effetto isola di calore induce a non avere grandi oscillazioni di temperatura e sia perché gli occupanti potrebbero chiudere le finestre per impedire l'ingresso dei rumori.

Le analisi delle condizioni di comfort adattivo sono state svolte per la città di Palermo e per la città di Roma. Sono stati valutati, per entrambe le città, 3 casi:

1. edificio tradizionale non isolato;
2. edificio isolato con fibre di legno dello spessore di 5 cm;
3. edificio con cool paint esterne.

Lo studio mette in luce che, per la città di Palermo, il caso peggiore, ovvero quello che per un numero maggiore di ore non consente di rientrare nel range delle temperature di comfort adattivo è il caso con isolamento tradizionale. Il numero di ore di surriscaldamento estivo è pari a 2065 ore nell'intera stagione estiva, pari al 71 % di ore (Fig. 5.2.7.1).

Nel caso tradizionale senza isolante, invece, il numero di ore di discomfort estivo è pari a 1461 ore durante l'intera estate, ovvero uguale a circa il 50 % delle ore totali (Fig. 5.2.7.2).

Infine, si può notare che il caso migliore, che consente di minimizzare il numero di ore di discomfort, è l'edificio con cool paint esterne. Il numero di ore totali in cui non si riesce a garantire il comfort estivo è pari 898 ore (31% delle ore totali estive) (Fig. 5.2.7.3).

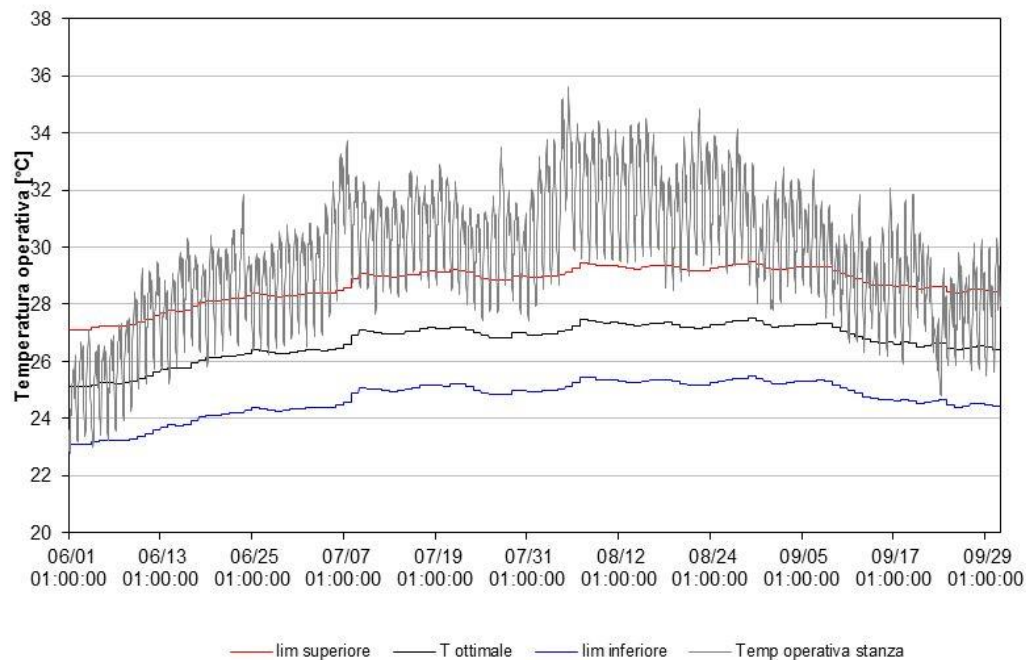


Fig. 5.2.7.1: Città di Palermo, involucro edilizio isolato (spessore 5 cm). Analisi delle condizioni di comfort secondo il modello Adattivo (temperatura operativa durante la stagione estiva)

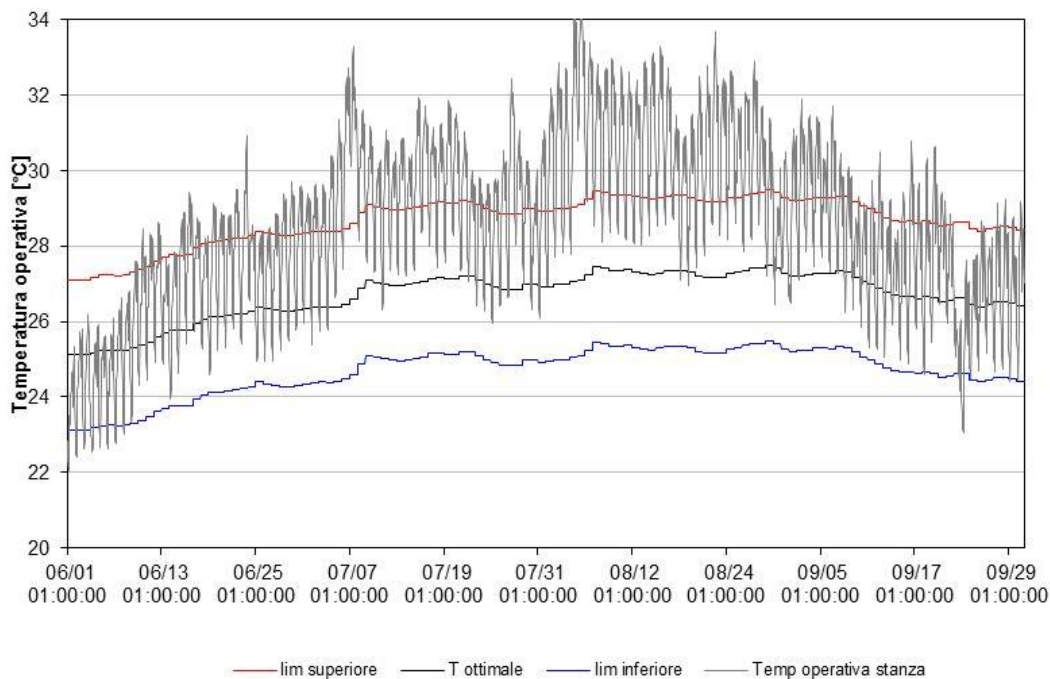


Fig. 5.2.7.2: Città di Palermo, involucro edilizio tradizionale non isolato. Analisi delle condizioni di comfort secondo il modello Adattivo (temperatura operativa durante la stagione estiva)

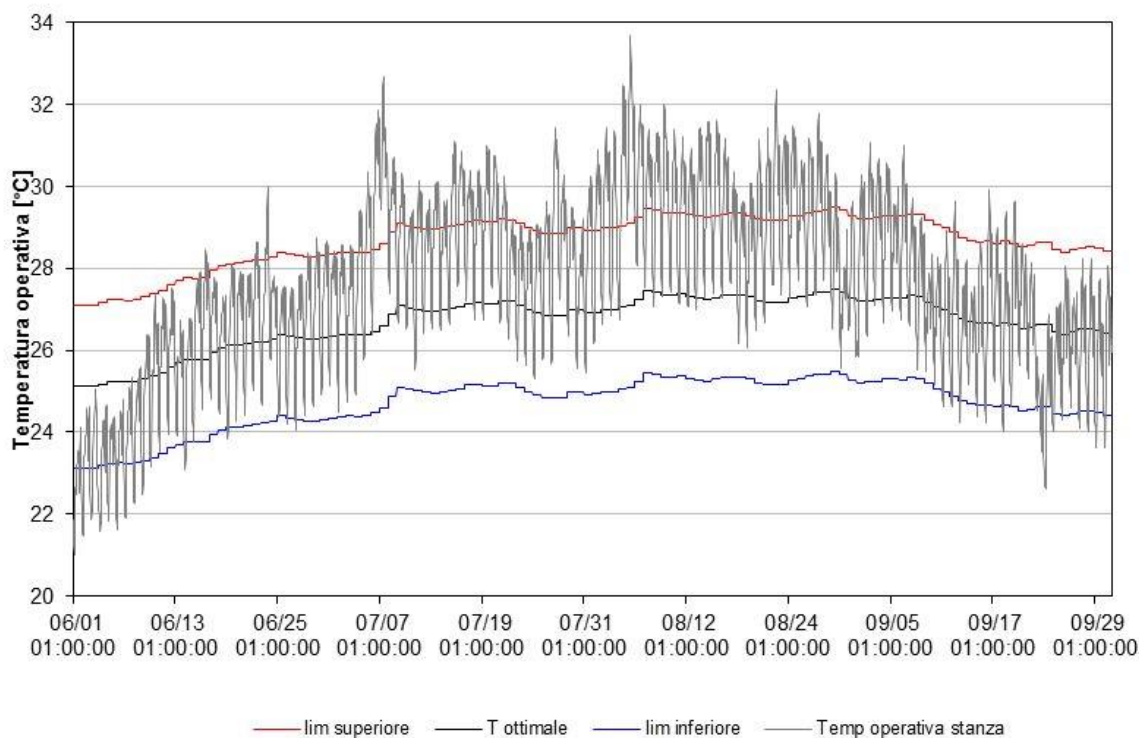


Fig. 5.2.7.3: Città di Palermo, involucro edilizio con cool paints. Analisi delle condizioni di comfort secondo il modello Adattivo (temperatura operativa durante la stagione estiva)

Nel caso della città di Roma, l'edificio che comporta il controllo peggiore della temperatura all'interno degli spazi confinati è quello isolato. Questo caso, per il 50 % delle ore estive, ovvero per 1455 ore, non permette un adeguato controllo climatico.

Il caso tradizionale non isolato (Fig. 5.2.7.4) migliora il controllo dei livelli di temperatura, in regime estivo, rispetto al secondo caso, ossia nel caso di involucro edilizio isolato (Fig. 5.2.7.5); infatti, con le caratteristiche termofisiche dell'edificio isolato termicamente è possibile avere un numero di ore di surriscaldamento pari al 50 % (caso isolato); invece, nell'edificio non isolato il numero di ore di discomfort estivo è pari al 22 % (equivalente a 645 ore).

Infine, il caso migliore (Fig. 5.2.7.6), osservando sempre il numero di ore di surriscaldamento estivo, risulta essere il caso con cool paints sulle superfici esterne. In questo edificio, il numero di ore sull'intera stagione estiva di surriscaldamento diminuisce a 293 ore (pari al 10 % delle ore totali).

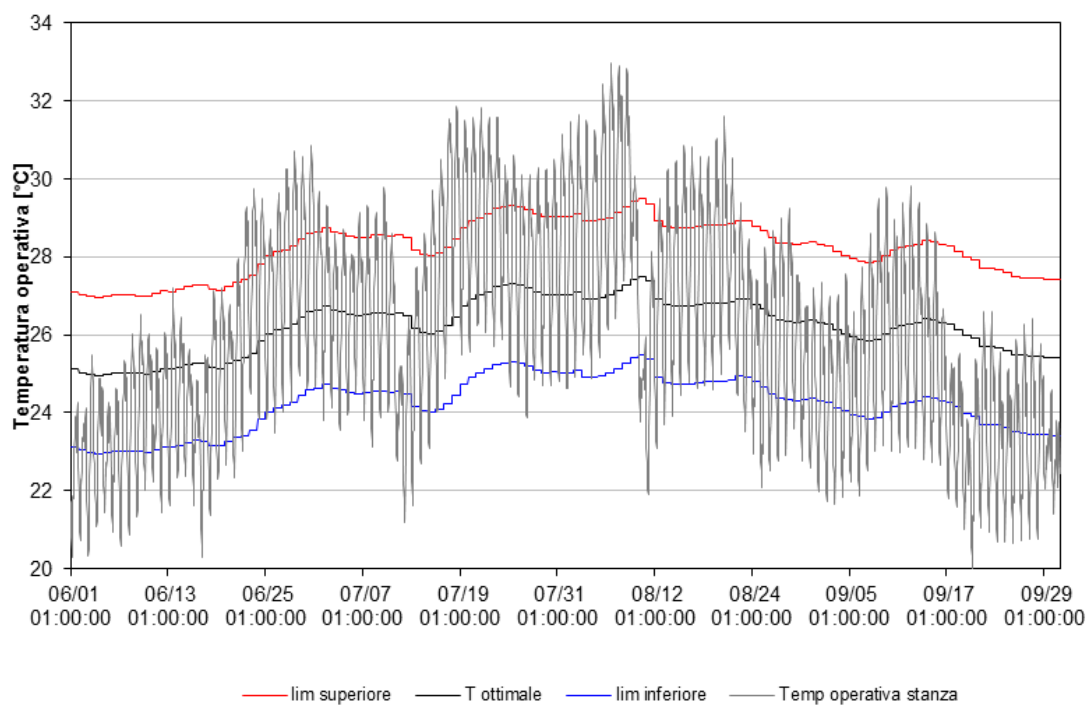


Fig. 5.2.7.4: Città di Roma, involucro edilizio tradizionale non isolato. Analisi delle condizioni di comfort secondo il modello Adattivo (temperatura operativa durante la stagione estiva)

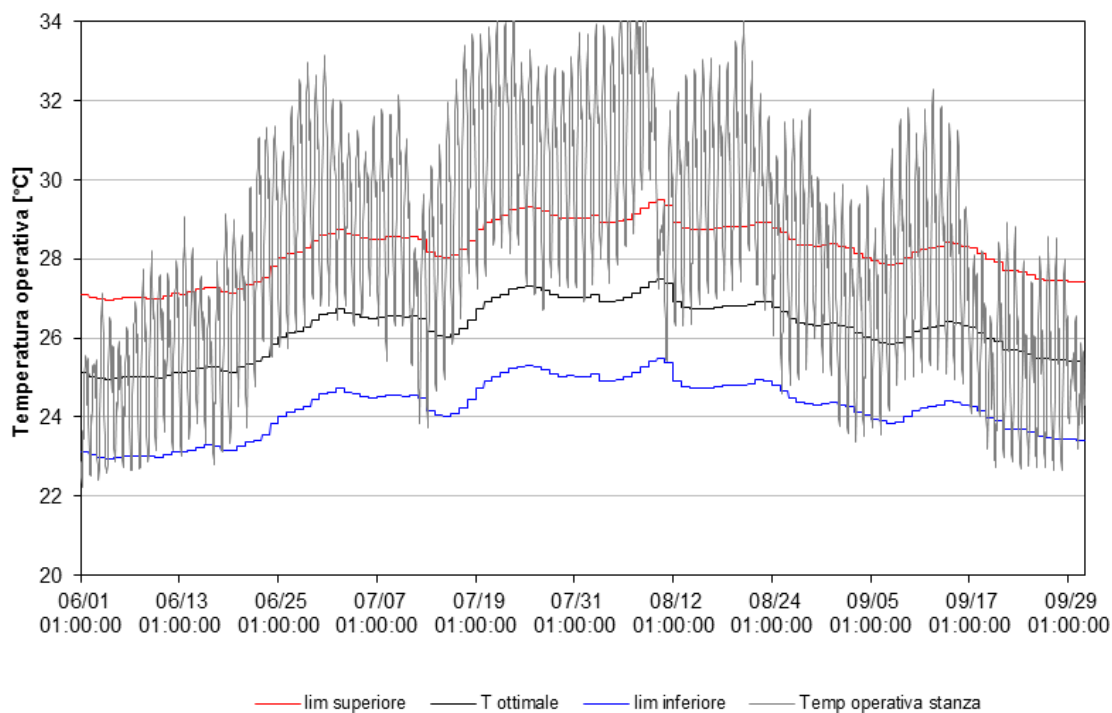


Fig. 5.2.7.5: Città di Roma, involucro edilizio isolato (spessore 5 cm). Analisi delle condizioni di comfort secondo il modello Adattivo (temperatura operativa durante la stagione estiva)

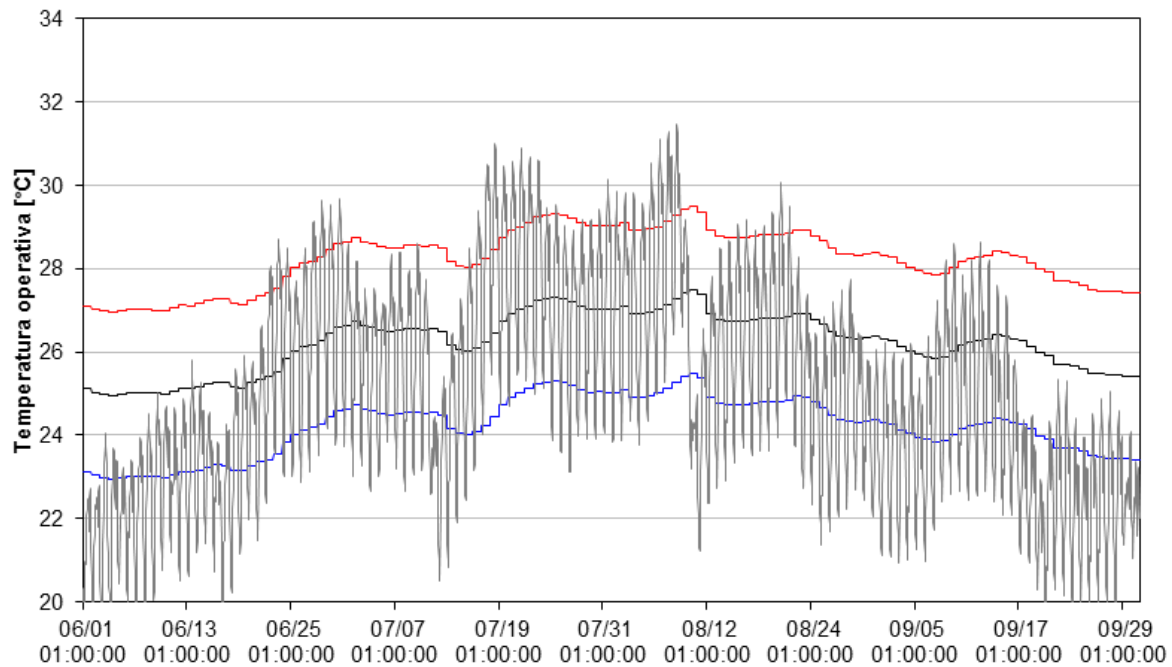


Fig. 5.2.7.6: Città di Roma, involucro edilizio con cool paint. Analisi delle condizioni di comfort secondo il modello Adattivo (temperatura operativa durante la stagione estiva)

5.2.8 Il coating factor, un fattore per ottimizzare la scelta delle finiture superficiali esterne ed interne

Questa attività di ricerca termina con la determinazione di un nuovo fattore denominato Coating Factor (CF), che descrive il clima della località analizzata ed ha l'intento di ottimizzare la scelta delle finiture superficiali esterne ed interne in funzione delle caratteristiche climatiche della località (Fig. 5.2.8.1).

L'indice è stato suddiviso in:

1. OCF (outside coating factor) (Eq. 5.13);
2. ICF (inside coating factor) (Eq. 5.14)

in modo da distinguere le strategie progettuali per la scelta ottimale delle finiture superficiali esterne da quelle interne.

Tali indici sono stati così definiti:

$$OCF = [(CDD - HDD) / 1000] + (RAD / 10000) \quad (5.13)$$

$$ICF = [(CDD - HDD) / 1000] \quad (5.14)$$

Dove:

- HDD: gradi giorno di riscaldamento (temperatura di riferimento pari a 18.3 °C) [K·day];
- CDD: gradi giorno di raffrescamento (temperatura di riferimento pari a 18.3 °C) [K·day];
- RAD: radiazione diretta mensile media su superficie orizzontale [Wh/m²].

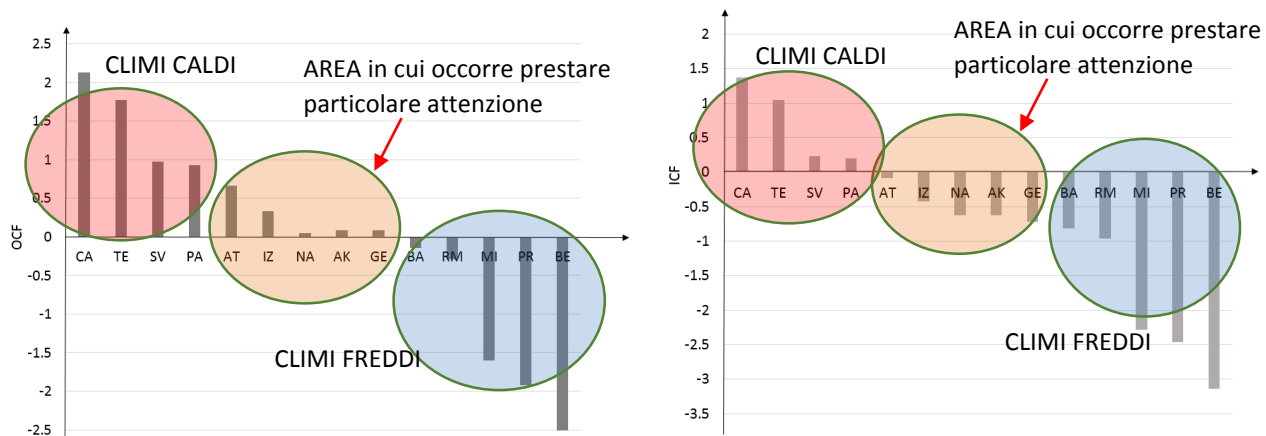


Fig. 5.2.8.1: Coating Factor. OCF nella figura a sinistra e l'ICF in quella a destra. CA Cairo, TE Tenerife, SV Siviglia, PA Palermo, AT Atene, IZ Izmir, NA Napoli, AK Ankara, GE Gerusalemme, BA Barcellona, RM Roma, MI Milano, PR Parigi, BE Berlino

I due indici mettono in mostra che Atene, Izmir, Napoli, Ankara e Gerusalemme si trovano, nel caso dell'OCF, nell'area positiva e, nel caso dell'ICF, nella zona negativa. Da ciò ne consegue che per le città in cui si ha il passaggio da una zona negativa a quella positiva (o viceversa) il progettista deve prestare particolare attenzione, in quanto non è facilmente determinato l'intervento più opportuno da svolgere; ovvero, occorre considerare la finalità da raggiungere (privilegiare l'aspetto energetico invernale, oppure quello estivo, oppure quello annuale). Ad esempio, per la città di Napoli, caratterizzata da estati calde, ma anche da inverni piuttosto rigidi, occorre una scrupolosa attenzione da parte del tecnico sulla scelta delle finiture superficiali, in quanto il fattore ICF mette in luce che i gradi giorno estivi sono più bassi di quelli invernali (da qui scaturisce l'appartenenza di Napoli nell'area negativa), ma introducendo anche la radiazione solare e, quindi, il fattore OCF, si ha il passaggio nella zona positiva.

Si è cercato di fornire delle linee guida per la scelta ottimale delle finiture superficiali esterne, in funzione del valore assunto dall'OCF, sia per edifici climatizzati che non climatizzati (Fig. 5.2.8.2 - Fig. 5.2.8.3); invece, le strategie riguardanti la scelta più opportuna delle finiture superficiali interne, in relazione al valore dell'ICF, considerano il livello di isolamento termico dell'involucro edilizio (non/poco isolato ed isolato) (Fig. Fig. 5.2.8.4).

Analizzando in dettaglio l'OCF (Fig. 5.2.8.2), si evince che esso è stato valutato per edifici climatizzati in modo attivo mediante opportuni impianti, ma anche per edifici non climatizzati nella stagione estiva (e quindi supportato dall'indice di comfort adattativo).

L'OCF mette in luce che, per valori positivi ricadenti nel range $[0, +2.5]$, ossia in quelle località caratterizzate da un clima molto caldo, il progettista deve privilegiare le finiture superficiali esterne con un alto fattore α_{sol} ed un'alta ϵ_{inf} , mentre un fattore OCF negativo, ovvero, prendendo in esame l'intervallo $[-0.5, -2.5]$ si rende più opportuno indirizzare la scelta verso quelle finiture superficiali esterne contraddistinte da valori bassi di ρ_{sol} e di ϵ_{inf} .

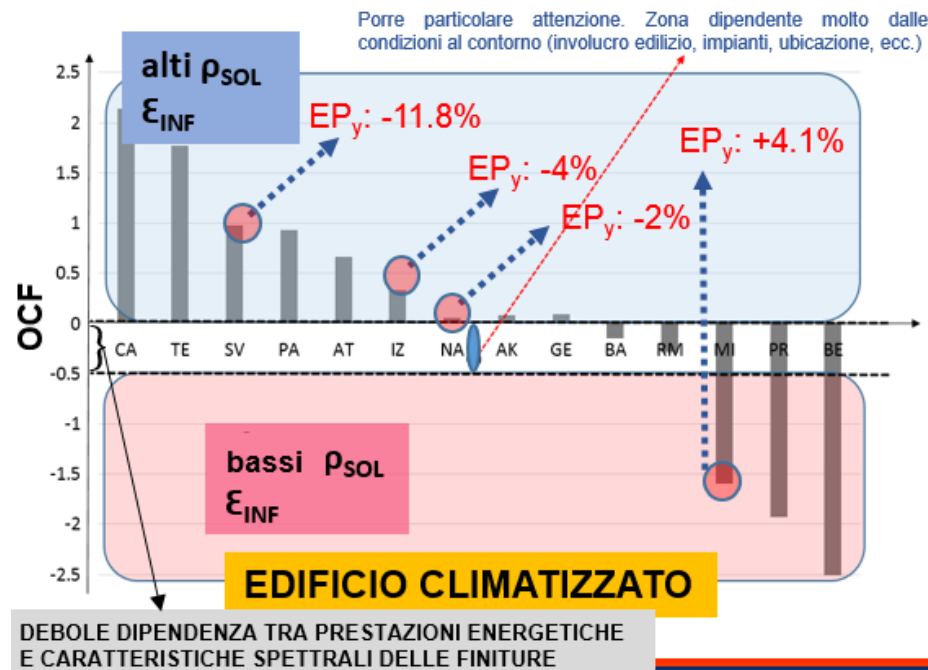


Fig. 5.2.8.2: Scelta ottimizzata delle finiture superficiali esterne in funzione del parametro, OCF, per edifici climatizzati

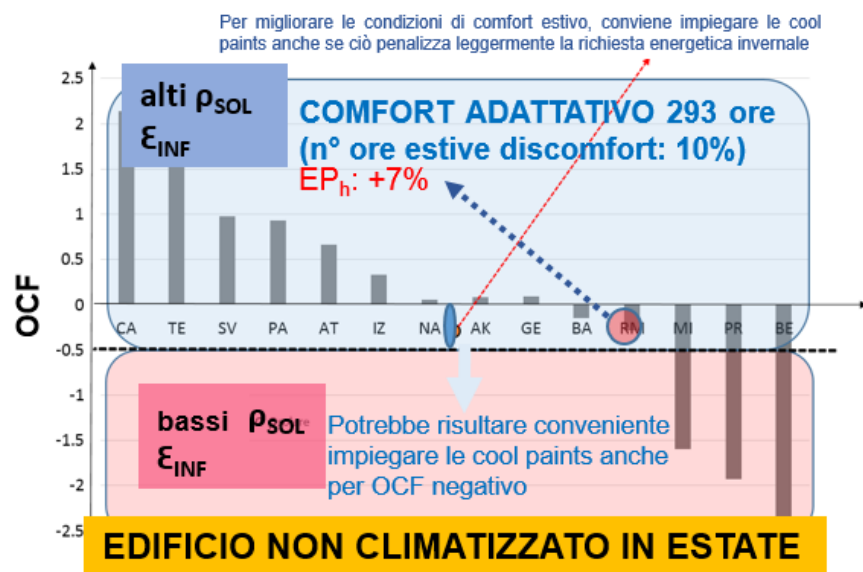


Fig. 5.2.8.3: Scelta ottimizzata delle finiture superficiali esterne in funzione del parametro, OCF, per edifici non climatizzati

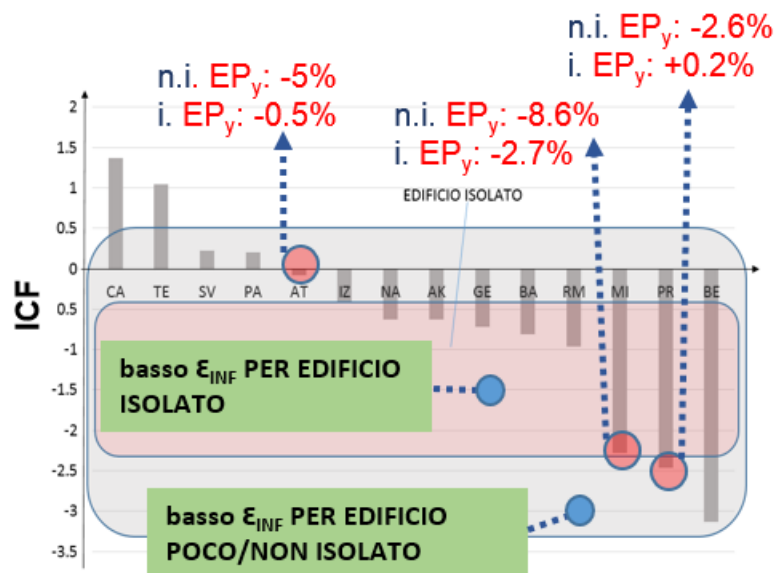


Fig. 5.2.8.4: Scelta ottimizzata delle finiture superficiali interne in funzione del parametro, ICF, per edifici non/poco isolati e per edifici isolati

La zona che presenta un OFC con range $[0, -0.5]$ è un'area in cui si presenta una debole dipendenza tra le prestazioni energetiche dell'edificio e le caratteristiche spettrali dei rivestimenti dei vari componenti edilizi opachi; pertanto, occorre valutare con attenzione l'applicazione delle finiture superficiali in funzione dell'obiettivo da raggiungere e, quindi, bisogna analizzare attentamente caso per caso. In modo analogo si leggono anche le Figs. 5.2.8.3 e 5.2.8.4.

Nelle Figs. 5.2.8.5 e 5.2.8.6, si riportano i benefici e/o gli aggravii energetici (ed anche in termini di numero di ore di discomfort estivo) supportate dall'attività di ricerca (in ambito energetico ed anche di comfort adattativo) svolta precedentemente.

A titolo di esempio, viene descritta la Fig. 5.2.8.5 dalla quale si evince che a Siviglia, città ricadente nell'area positiva dell'OFC, conviene utilizzare le cool paints sulle superfici esterne, in quanto l' EP_y viene ridotto di circa il 12 %; invece, analizzando il caso di Milano, città con clima dominante freddo (e, quindi, ricadente nella zona negativa dell'OFC), l'utilizzo delle cool paints induce un aumento di circa il 4 % dell' EP_y .

Nel caso in cui l'edificio non sia climatizzato in estate, è possibile notare che l'area di convenienza alle cool paints diventa più ampia, $[+2.5, -0.5]$, ed in tal caso potrebbe risultare utile, ad esempio, utilizzare le cool paints anche a Roma in cui il numero di ore di surriscaldamento estivo è pari al 10 % delle ore complessive estive, anche se si presenta una penalizzazione dal punto di vista energetico, in regime invernale (+ 7 %) (Fig. 5.2.8.5).

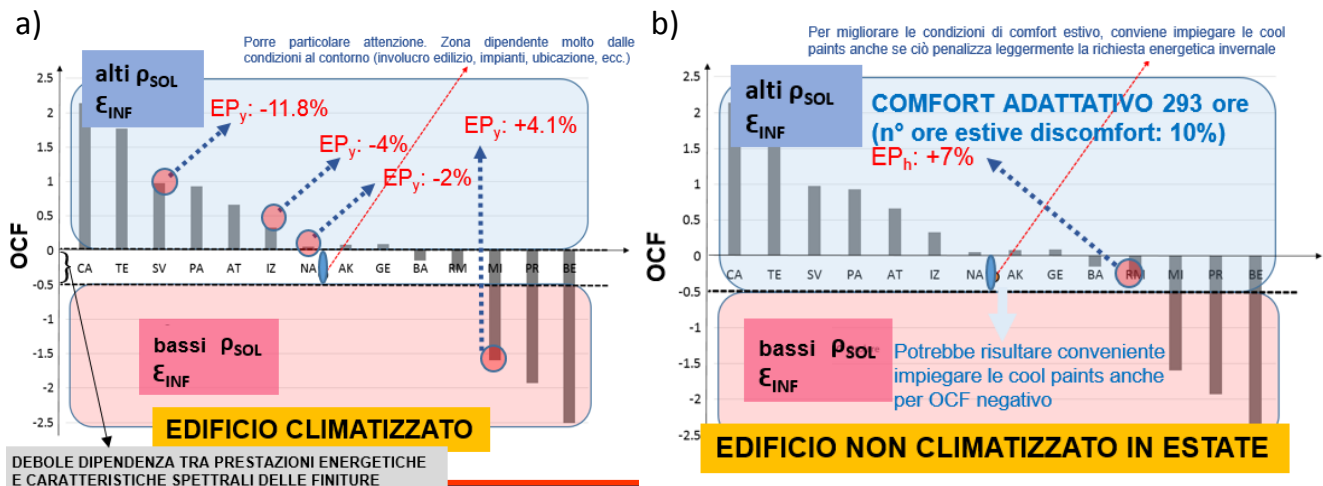


Fig. 5.2.8.5: Outside coating factor. Benefici e/o aggravii energetici e di comfort termico derivanti dall'applicazione delle cool paints (alti ρ_{sol} e di ϵ_{inf}) per a) edifici climatizzati; b) edifici non climatizzati in estate

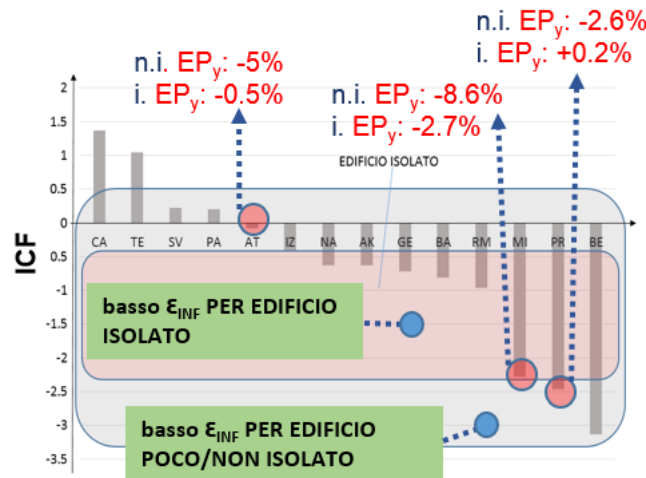


Fig. 5.2.8.6: Inside coating factor. Benefici e/o aggravii energetici derivanti dall'applicazione dell'intonaco basso-emissivo (i. = isolato, n.i. = non isolato)

5.3 Ottimizzazione dell'involucro edilizio mediante l'indagine sul livello ottimale di isolante termico

5.3.1 Introduzione

L'evoluzione legislativa e normativa, negli anni, ha subito un forte cambiamento; difatti, si è assistito al passaggio da un sistema basato sul limite prescrittivo in funzione della tipologia degli interventi edilizi da effettuare, ad un sistema basato sul limite prestazionale, in cui le prestazioni energetiche dell'edificio oggetto di studio devono essere confrontate con quelle di un edificio di

riferimento, come richiesto dalla metodologia innovativa del “Cost-optimal”, introdotto dalla Direttiva 2010/31/EU [16] integrata dal Regolamento delegato 244/2012 [45].

Con il passare degli anni, quindi, le priorità internazionali e comunitarie sono molto cambiate; dapprima, l’attenzione era incentrata sulla riduzione della domanda energetica, poi si è spostata sul decremento della domanda di energia e delle emissioni nocive in atmosfera ed, attualmente, si punta a ridurre energia, emissioni e costi, come previsto dalla nuova metodologia (Fig. 5.3.1.1).

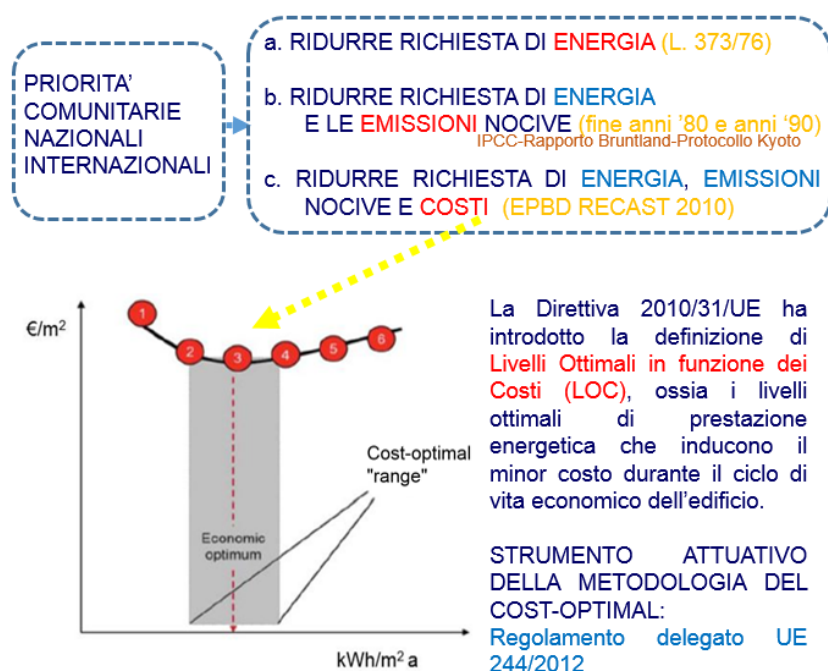


Fig. 5.3.1.1: La nuova Metodologia del Cost-optimal

Nell’ambito di questa attività di ricerca, è stato indagato lo spessore ottimale dell’isolamento termico in funzione dei carichi termici interni, considerando anche la suddetta metodologia innovativa del “Cost-optimal”.

Questo studio è stato rivolto al settore terziario, con particolare riferimento agli edifici adibiti ad uso uffici, in quanto si tratta di un settore fortemente energivoro e caratterizzato da un’evoluzione dei fabbisogni energetici sempre più critica.

Il principale scopo dell’attività di ricerca svolta è stato quello di individuare lo spessore ottimale, nel caso di uffici con carichi interni usuali (10-20 W/m²) e con carichi interni più alti (30 W/m²), per minimizzare, in climi freddi e soprattutto in quelli caldi, il fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale/estiva, le emissioni di anidride carbonica ed i relativi costi.

Dalla letteratura risulta che, tra le possibili strategie passive d’intervento con il fine di ridurre il fabbisogno energetico degli edifici, è molto diffuso l’utilizzo di uno o più strati di materiale coibente [111] [112] [113] [114] sull’involucro edilizio opaco. Tuttavia, l’applicazione acritica

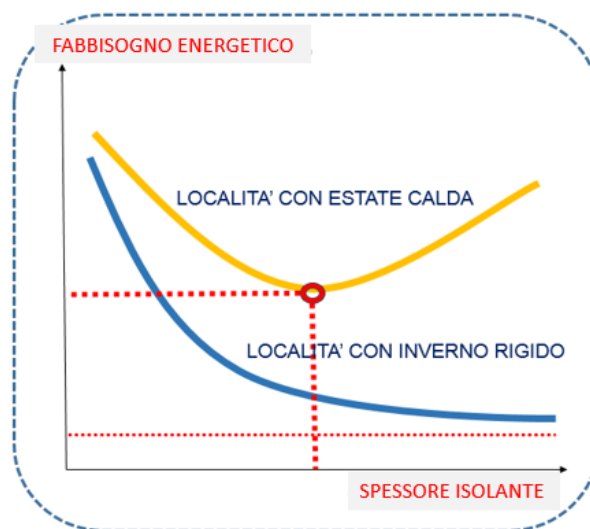


Fig. 5.3.1.2: Fabbisogno energetico di riscaldamento e raffreddamento al variare dello spessore di isolante termico

di notevoli spessori di materiale isolante potrebbe comportare conseguenze controproducenti dal punto di vista:

1. energetico/ambientale;
2. economico;
3. comfort termico.

Infatti, nel caso di edifici caratterizzati da elevati carichi termici interni, come appunto gli uffici, e/o edifici siti in località con estati calde ed inverni miti, valori troppo bassi della trasmittanza termica stazionaria (U) dei componenti edilizi opachi e, dunque, spessori troppo elevati di isolante termico, potrebbero generare un aumento della domanda energetica per la climatizzazione estiva (inversione della curva) superiore al beneficio energetico conseguibile nella stagione di riscaldamento (Fig. 5.3.1.2). Pertanto, le difficoltà per l'involucro edilizio molto isolato di smaltire l'energia termica verso l'ambiente esterno in estate potrebbero rendere nulli, o quasi, i vantaggi dovuti alla riduzione delle dispersioni termiche in inverno.

Lo spessore ottimale dell'isolante termico è connesso a diverse variabili (clima, tipologia edilizia, destinazione d'uso, orientamento, costi, tipologia di fonte energetica impiegata, efficienza dei sistemi impiantistici, ecc.) e, usualmente, l'incremento dello spessore determina una riduzione dei carichi termici dell'edificio e, quindi, dei costi di gestione energetica, ma induce un aumento dell'investimento, per cui lo spessore ottimale non assume valori troppo elevati [115]. In molti studi condotti finora, i risultati delle analisi economiche si basano sia sulla domanda di riscaldamento che di raffreddamento in regime stazionario [116] [117] [118]; invece, piuttosto limitati sono gli studi in regime transitorio [119] [120] [121]. Altri ricercatori, invece, come Dombayci [122], Comakli et al. [123], Iqbal et al. [124], sostengono che per valutare lo spessore ottimale di isolante termico è necessario correlare lo studio anche ad altri parametri, oltre quelli economico/energetici tradizionali, come le emissioni di CO_2 e SO_2 . L'influenza dei vari vettori energetici è stato indagato, invece, da Yildiz et al [125].

Attualmente, sembra che, nei vari studi, la questione relativa allo spessore di isolante termico sia principalmente correlata all'aspetto energetico invernale a discapito di quello estivo, come mostrano le recenti disposizioni legislative in materia di efficienza energetica in edilizia, poichè

sono ancora poche le ricerche sul tema [126] [127], soprattutto se si utilizza un approccio che considera differenti obiettivi come proposto dalla metodologia comparativa del “Cost-optimal” [128].

Da tali motivazioni deriva questo studio, volto a valutare lo spessore ottimale di isolante termico mediante una metodologia innovativa, quella del “Cost-optimal”, che consente di mettere in gioco diversi fattori e, quindi, di estendere l’attività ad un approccio multi-obiettivo. I risultati mostrano la necessità di non iperisolare termicamente gli edifici, soprattutto in quelle località caratterizzate da estati calde.

Pertanto, nella ricerca condotta sono stati valutati, mediante simulazioni energetiche dinamiche, eseguite con il motore di calcolo EnergyPlus, gli impatti, in termini energetici ed economici, dell’applicazione di materiale coibente all’esterno dell’involucro edilizio di un edificio di riferimento. Le analisi sono state condotte per diverse città, tra cui: Palermo, Milano ed il Cairo.

Infine, al fine di considerare anche il comfort termico, è stata proposta un’integrazione alla metodologia del “Cost-optimal” prevista dal Regolamento delegato EU 244/2012 [45].

Nei punti elencati di seguito, sono riportate le principali fasi considerate, e descritte nei paragrafi successivi, per analizzare gli aspetti tecnico-economici, energetici ed ambientali, al fine di ottenere gli spessori di isolante termico ottimali dell’involucro edilizio opaco. Pertanto, tale studio ha preso in considerazione:

1. simulazione energetica dinamica per valutare il fabbisogno energetico dell’involucro edilizio, l’energia fornita dagli impianti di climatizzazione e l’energia primaria da essi richiesta;
2. analisi del costo “optimal” con approccio finanziario;
3. analisi del costo “optimal” con approccio macroeconomico;
4. relazione costo-energia: ottimizzazione degli spessori di isolante;
5. determinazione delle emissioni di CO₂;
6. determinazione di alcuni aspetti critici derivanti dalle disposizioni legislative;
7. determinazione di alcuni aspetti critici in termini di comfort termico;
8. proposta di integrazione alla metodologia del “Cost-optimal” prevista dal Regolamento delegato 244/12.

Le tematiche analizzate sono riportate in Fig. 5.3.1.3.

Sono state effettuate diverse simulazioni energetiche, facendo variare lo spessore dello strato isolante della parete esterna e della copertura dell’edificio in esame, e gli apporti interni dovuti alle apparecchiature d’ufficio, assegnando rispettivamente valori di volta in volta pari a 10, 20, 30 W/m².



Fig. 5.3.1.3: Principali tematiche analizzate per l'ottimizzazione dello spessore di isolante termico negli edifici

5.3.2 L'edificio oggetto di indagine

L'edificio oggetto di studio (Fig. 5.3.2.1) di questa attività di ricerca presenta le caratteristiche riportate in Tab. 5.3.2.1 che sono state definite sulla base di recenti ricerche statistiche sul parco edilizio italiano degli edifici adibiti ad ufficio, individuando le peculiarità edilizie ed impiantistiche degli immobili costruiti nel periodo 1946-1970 [129].

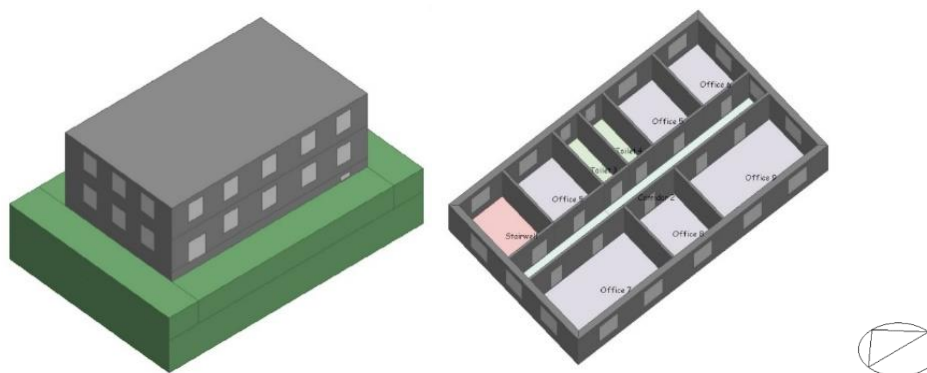


Fig. 5.3.2.1: Edificio di riferimento

L'edificio si caratterizza dalla presenza di 3 livelli, uno interrato e due fuori terra. La struttura è reticolare in cemento armato e le tamponature presentano una doppia fodera di laterizi. L'impianto di riscaldamento/climatizzazione estiva è costituito da fan-coils alimentati da una pompa di calore elettrica aria-acqua (Tab. 5.3.2.2).

Componente	Stratigrafia	s (m)	λ (W/mK)	c (kJ/kgK)	U (W/m ² K)	Y (W/m ² K)
Pareti	Intonaco	0.02	0.70	1.01	1.8 R = 0.12 m ² K/W	1.09
	Laterizi forati	0.08	0.90	0.84		
	Intercapedine d'aria	0.06				
	Laterizi pieni	0.12	0.81	0.84		
Copertura	Intonaco	0.02	0.70	1.01	1.01 R = 0.33 m ² K/W	0.64
	Solaio	0.22				
	Impermeabilizzante	0.002	0.20	1.67		
	Argilla espansa	0.05	0.12	0.92		
	Pavimento di cemento	0.03	1.40	0.67		
Finestre	Telaio in legno	0.10	2.50		2.050	
	Vetro chiaro		1.00			
	Intercapedine riempita di argon		0.017			
	Vetro chiaro		1.00			

Tab. 5.3.2.1: Caratteristiche termiche dei diversi componenti edilizi

Località	Stagione riscaldamento	Ore funzionamento o impianto	T interna	CO P	Stagione raffrescamento	Ore funzionamento o impianto	T interna	EER
Palermo	1 dic – 31 mar	8 h (8-12 e 16-20)	20°C	2.8	1 mag – 30 set	10 h (9-19)	26°C	2.5
Milano	15 ott – 15 apr	14 h (8-20)	20°C	2.5	1 giu – 15 set	7 h (11-18)	26°C	2.8

Tab. 5.3.2.2: Principali dati relativi agli impianti di climatizzazione considerati

5.3.3 Metodologia utilizzata (“Cost-optimal”)

In materia di prestazione energetica degli edifici, dal 1970 al 2010, vi è stata una principale priorità: far fronte alle crisi energetiche con la misura del “risparmio energetico” e del miglioramento dell’efficienza energetica.

L’evoluzione normativa ha indotto via via alla crescente richiesta di edifici ad elevate prestazioni energetiche e, quindi, ha spinto i progettisti ed i committenti a scegliere materiali, soluzioni tecniche e tecnologiche sempre più costose.

Riguardo all’involucro edilizio, l’isolamento termico è stato molto spesso indirizzato all’ottenimento di una ridotta trasmittanza termica, in quanto le prime Nazioni che hanno legiferato in questo ambito sono state quasi sempre quelle del Nord-Europa (ad esempio, la Germania), caratterizzate principalmente da inverni molto rigidi.

La mancanza di strumenti normativi per una valutazione dettagliata del rapporto costi-benefici delle diverse soluzioni ha favorito l'impiego di materiali molto performanti energeticamente, ma anche molto costosi, talvolta trascurando i vantaggi/svantaggi monetari conseguibili durante il ciclo di vita dell'edificio.

A questo problema ha tentato di porre rimedio la Direttiva EPBD recast 2010/31/EU sull'efficienza energetica negli edifici, che per la prima volta sottolinea la necessità di effettuare delle scelte progettuali, tenendo conto del rapporto costi-benefici durante l'intero ciclo di vita stimato degli edifici, indirizzando, quindi, tutti gli attori coinvolti nel processo edilizio a scegliere soluzioni costruttive energeticamente efficienti, ma valutate anche sotto il profilo dei costi. Con tale approccio, una soluzione molto performante dal punto di vista energetico potrebbe presentare un valore del costo globale maggiore rispetto ad una soluzione meno efficace, per cui potrebbe divenire una soluzione poco opportuna sotto il profilo di costi.

Per individuare lo spessore d'isolante ottimale è stata adottata una metodologia innovativa, recentemente introdotta in ambito europeo, ovvero quella del Cost-optimal. Essa è stata definita dalla Direttiva Europea 2010/31/EU [16] e dal successivo Regolamento Delegato (UE) n. 244/2012 [45], mentre negli Orientamenti della Commissione Europea 2012/C115/01 [130] sono chiariti molti aspetti applicativi.

Le fasi considerate sono esplicitate in Fig. 5.3.3.1.

La metodologia consiste nell'individuazione del “livello ottimale in funzione dei costi” [128], ovvero il livello di prestazione energetica che comporta il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato degli edifici, individuando più misure di efficienza energetica da confrontare. L'obiettivo è ricavare il fabbisogno di energia primaria per ogni intervento proposto ed il costo globale annesso, quest'ultimo definito dalla somma di:

- costi d'investimento iniziali (costi di materiali, componenti, compensi, tasse, ecc.);
- costi periodici o annuali (costi di gestione energetica, di manutenzione, di sostituzione, di pulizia, ecc.);
- valori finali (valore residuo dell'intervento proposto al termine della vita dell'edificio).

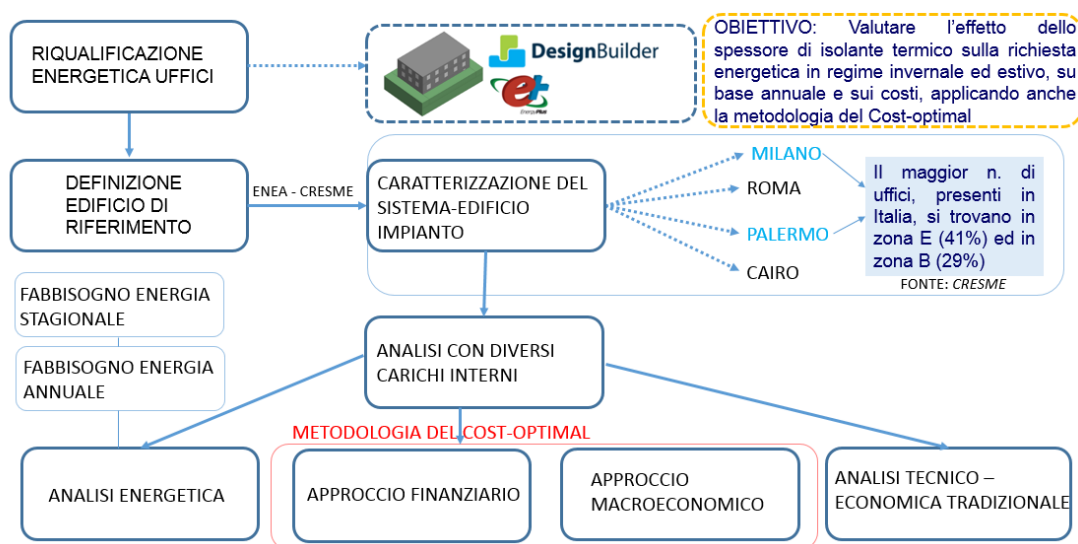


Fig. 5.3.3.1: Fasi dell'attività di studio

Ciò rientra nella cosiddetta “Prospettiva Finanziaria”. Oltre a questa prospettiva, la nuova metodologia prevede il calcolo del costo globale, considerando anche la “Prospettiva macroeconomica”, che tiene conto non solo di tutti i costi menzionati nella prospettiva finanziaria, ma anche di quei costi associati alle emissioni di CO₂ in atmosfera, che correlano il danno ambientale dovuto al consumo di energia negli edifici.

Pertanto, il Regolamento prevede l'adozione di due valutazioni:

- prospettiva finanziaria, basata sulla prospettiva dell'investitore privato (Eq. 5.15);
- prospettiva macroeconomica, che tiene conto del punto di vista dello Stato (analisi finanziaria + valutazione dei costi delle emissioni di CO₂) (Eq. 5.16) (Fig. 5.3.3.2).

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (5.15)$$

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j)R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (5.16)$$

dove:

τ = periodo di calcolo

$C_g(\tau)$ = costo globale (riferito all'anno iniziale τ_0) nell'arco del periodo di calcolo

C_I = costo iniziale dell'investimento per la misura o l'insieme di misure j

$C_i(j)$ = costo annuale durante l'anno i per la misura o l'insieme di misure j

$V_{f,\tau}(j)$ = valore residuo della misura o l'insieme di misure j

$R_d(i)$ = fattore di sconto per l'anno i

$C_{c,i}(j)$ = costo delle emissioni di CO₂ per la misura o l'insieme di misure j

Il calcolo si svolge per una **durata definita**:
 = 30 anni per edifici residenziali
 ≥ 30 anni per edifici non residenziali



Fig. 5.3.3.2: Costi da considerare secondo la metodologia del "cost-optimal" (prospettiva macroeconomica)

Da quanto sopra descritto, si evince che un'azione di ottimizzazione dell'efficienza energetica deve essere valutata sotto il profilo energetico, economico ed ambientale.

Per ciò che riguarda quest'ultimo punto, è necessario determinare quale fattore di emissione deve essere utilizzato per calcolare le emissioni nocive in atmosfera.

I fattori di emissione sono i coefficienti che quantificano le sostanze nocive introdotte in atmosfera in funzione dei materiali, delle tecnologie impiegate, ecc. Le emissioni di CO₂ sono calcolate per ciascun vettore energetico, moltiplicando il consumo energetico finale per il corrispondente fattore di emissione. Sono previsti due approcci:

1. *IPCC3* – fattori di emissione per la combustione di carburante – sulla base del tenore di carbonio di ciascun combustibile;

2. *LCA (Valutazione del Ciclo di Vita)* (Tab. 5.3.3.1), impiegato in questo lavoro di tesi, che prevede l'utilizzo di fattori di emissione per il ciclo di vita complessivo di ciascun vettore energetico, ossia sono incluse le emissioni di gas serra dovute alla combustione di carburante, ma anche quelle dovute all'intera catena di fornitura energetica – uso, trasporto e lavorazione.

Per quel che riguarda il fattore di emissione per l'energia elettrica, è necessario indicare *il fattore di emissione nazionale per l'elettricità (NEEFE)* e, ove applicabile, *il fattore di emissione locale (EFE)*. Quest'ultimo si applica solo se vi sono impianti di produzione di energia all'interno del territorio dell'amministrazione locale.

Le centrali termoelettriche emettono spesso grandi quantità di CO₂ e molto frequentemente accade che la domanda di energia elettrica in un determinato paese è soddisfatta da molteplici impianti. Per questo motivo, diventa difficoltoso quantificare le emissioni per ogni singolo comune ed è consigliabile utilizzare un fattore di emissione nazionale oppure europeo come punto di partenza per determinare il fattore di emissione locale. Tale fattore di emissione riflette le emissioni medie di CO₂ legate alla produzione nazionale o europea di elettricità. I fattori di

TABLE 5. NATIONAL AND EUROPEAN EMISSION FACTORS FOR CONSUMED ELECTRICITY		
COUNTRY	STANDARD EMISSION FACTOR (t CO ₂ /MWh _e)	LCA EMISSION FACTOR (t CO ₂ -eq/MWh _e)
Austria	0.209	0.310
Belgium	0.285	0.402
Germany	0.624	0.706
Denmark	0.461	0.760
Spain	0.440	0.639
Finland	0.216	0.418
France	0.056	0.146
United Kingdom	0.543	0.658
Greece	1.149	1.167
Ireland	0.732	0.870
Italy	0.483	0.708
Netherlands	0.435	0.716
Portugal	0.369	0.750
Sweden	0.023	0.079
Bulgaria	0.819	0.906
Cyprus	0.874	1.019
Czech Republic	0.950	0.802
Estonia	0.908	1.593
Hungary	0.566	0.678
Lithuania	0.153	0.174
Latvia	0.109	0.563
Poland	1.191	1.185
Romania	0.701	1.084
Slovenia	0.557	0.602
Slovakia	0.252	0.353
EU-27	0.460	0.578

Note that the year which the data represents varies between countries and between standard and LCA approach (6).

Tab. 5.3.3.1: Fattore di emissione LCA [107]

emissione nazionali ed europei variano di anno in anno a causa del mix energetico utilizzato nella produzione di elettricità. Queste variazioni sono causate dalla domanda di riscaldamento/climatizzazione estiva, dalla disponibilità delle fonti energetiche rinnovabili, dalla situazione del mercato dell'energia, dalle importazioni/esportazioni di energia, ecc. Queste variazioni avvengono indipendentemente dalle azioni intraprese dall'autorità locale. L'autorità locale può decidere di utilizzare un fattore di emissione nazionale oppure europeo. I fattori di emissione per gli approcci standard e LCA sono presentati nella Tab. 5.3.3.1 per tutti gli Stati membri (eccetto Malta e Lussemburgo per i quali i dati non sono disponibili) e valori medi per l'UE nel suo insieme. Si noti che i fattori di emissione LCA sono in tutti i casi superiori ai fattori di emissione standard. Per l'Italia il fattore di emissione nazionale per l'elettricità (NEEFE) è pari a 0.708 tCO₂-eq/MWh_e.

Gli Stati membri devono calcolare il costo delle emissioni di carbonio accumulato nel periodo di calcolo, moltiplicando le emissioni annuali di gas ad effetto serra per i prezzi previsti per tonnellata di CO₂ equivalente delle quote di emissione. Il costo delle emissioni è così calcolato: inizialmente si considera una soglia minima di 20 EUR per tonnellata di CO₂ equivalente fino al 2025, poi di 35 EUR fino al 2030 ed, infine, di 50 EUR dopo il 2030.

Il “livello ottimale di costo” associato ad un intervento di efficientamento energetico, quindi, individua il punto di equilibrio tra l'investimento ed il costo energetico durante l'intero ciclo di vita stimato di

un edificio, ovvero il punto di minimo della curva costi – energia (Fig. 5.3.3.4).

Il Regolamento prevede che gli Stati membri utilizzino un periodo di calcolo di 30 anni per gli edifici residenziali e non inferiore a 30 anni per gli edifici commerciali e non residenziali.

Per quegli elementi che presentano una vita utile superiore al periodo di calcolo, è necessario valutare il loro *valore residuo*, attualizzato all'inizio del periodo di calcolo.

Quelle soluzioni tecnologiche a cui è associata una migliore prestazione energetica determinano maggiori investimenti iniziali (zona a sinistra dell'area dell'ottimo economico); invece, le soluzioni meno efficienti e, quindi, contraddistinte da un minor investimento, determinano maggiori costi di gestione energetica (area a destra dell'ottimo).

Come detto, attualmente viene richiesta la valutazione del costo di ciascuna misura di efficienza energetica durante l'intero ciclo di vita, in modo tale da orientare le scelte tecnologiche verso quella soluzione a cui è associato il minor costo complessivo.

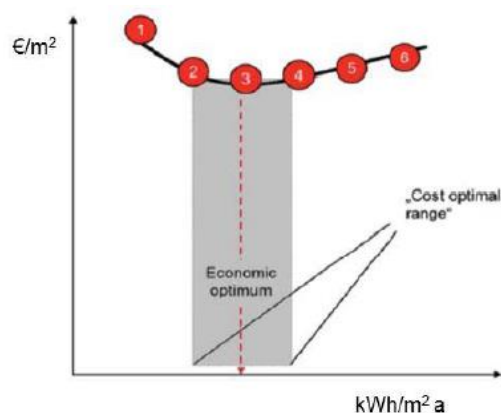


Fig. 5.3.3.4: Individuazione del “cost-optimal range”

I costi che si mantengono uguali in tutte le varianti di efficientamento proposte, possono essere tralasciati nel calcolo del costo globale. Pertanto, nello studio condotto, sono stati considerati esclusivamente i costi energetici, i costi del solo materiale isolante ed i costi delle emissioni (Tab. 5.3.3.2).

Inoltre, è stata comunque eseguita una tradizionale indagine tecnico-economica, valutando la convenienza dei vari interventi mediante il parametro del DPB.

	Spessore isolante termico (cm)					
Isolante termico (€/m²)	2	4	6	8	10	12
	3.50	5.20	7.80	10.40	13.00	15.60
Energia elettrica (€/kWh)	0.245					
Emissioni CO ₂ (€/t)	Fino al 2025		Dal 2026 al 2030		Dal 2030	
	25.00		35.00		50.00	

Tab. 5.3.3.2: Prezzo dell’isolante termico, dell’energia elettrica e delle emissioni di CO₂

L’obiettivo di ottimizzare la prestazione energetica dell’edificio, oggetto di studio, è stato perseguito valutando l’influenza, sul fabbisogno annuale di energia primaria, di un sistema di isolamento termico a cappotto, prevedendo tre configurazioni:

1. isolamento termico applicato soltanto alle pareti verticali (proposta A);
2. isolamento termico applicato alle pareti verticali ed al solaio di copertura (proposta B);
3. isolamento termico applicato alle pareti, al solaio di copertura ed al solaio di terra (proposta C);
4. isolamento termico applicato alle pareti, al solaio di copertura ed al solaio di terra (spessore fisso per il pavimento) (proposta D).

I valori di U, Y e k connessi ai diversi spessori di isolante termico (da 2 a 12 cm), sono riportati in Tab. 5.3.3.3 per i diversi componenti opachi dell’involucro edilizio.

Sono stati considerati due tipi di materiali coibenti, uno poco massivo come l’EPS e l’altro massivo come la fibra di legno. Nel seguito si farà riferimento ai risultati relativi all’isolante in fibra di legno ($\lambda=0,038$ W/mK, $\rho=150$ kg/m³, $c=2100$ J/kgK).

Componente	Proprietà termofisiche	Spessore isolante termico (cm)						
		0	2	4	6	8	10	12
Pareti	U (W/m ² K)	1.80	0.90	0.61	0.46	0.37	0.31	0.27
	Y (W/m ² K)	1.09	0.21	0.12	0.08	0.06	0.04	0.03
	k (kJ/m ² K)	60.70	55.60	54.40	53.90	53.50	53.20	53.00
Copertura	U (W/m ² K)	1.01	0.66	0.49	0.39	0.32	0.28	0.24
	Y (W/m ² K)	0.61	0.22	0.13	0.08	0.06	0.04	0.03
	k (kJ/m ² K)	55.40	52.70	51.30	50.50	50.10	49.70	49.50
Pavimento di terra	U (W/m ² K)	1.87	0.94	0.63	0.47	0.38	0.32	0.27
	Y (W/m ² K)	0.75	0.19	0.11	0.07	0.05	0.04	0.03
	k (kJ/m ² K)	76.80	71.00	69.70	69.20	68.80	68.50	68.30

Tab. 5.3.3.3: Valori della trasmittanza termica stazionaria U, della trasmittanza termica periodica Y_{ie} e della capacità interna areica k in funzione dello spessore di isolante termico considerato

La scelta dello spessore ottimale di isolante termico dipende in modo determinante dal clima del sito in cui sorge l'edificio; per questo motivo, sono state scelte quattro città diverse per eseguire questa attività di ricerca. Le località individuate sono: Palermo, Roma, Milano ed il Cairo. Per le località italiane, nella Tab. 5.3.3.4, in base alle attuali normative nazionali in materia di efficienza energetica [63], e a quelle precedenti [131], sono stati definiti i valori limiti di U da rispettare nel caso di interventi di riqualificazioni energetiche, mentre nella Tab. 5.3.2.2. sono stati definiti i profili di utilizzo degli impianti sulla base delle indicazioni legislative vigenti [103]. Per il Cairo sono stati utilizzati gli stessi parametri di Palermo.

Palermo e Milano sono state scelte perché rappresentano le province italiane con il maggior numero di edifici per uffici, rispettivamente 41 % nella zona climatica E (Milano) e 29 % nella zona climatica B (Palermo) [35].

Città	Valori di riferimento di U fino al 30.09 2015 (DPR 59/2009)			Valori di riferimento di U a partire dal 01.10.2015 (DM 26/06/2015)		
	Pareti	Copertura	Pavimento di terra	Pareti	Copertura	Pavimento di terra
Palermo	0.48	0.38	0.49	0.45	0.34	0.48
Milano	0.34	0.30	0.33	0.30	0.26	0.31

Tab. 5.3.3.4: Valori masimi della trasmittanza termica stazionaria, U (W/m²K)

Un altro parametro che incide sulla strategia di isolamento termico migliore è rappresentato dai carichi termici interni, che nel caso di edifici adibiti ad uso uffici, a causa della presenza di molte apparecchiature elettroniche, possono assumere valori molto alti. Proprio per questo motivo lo studio analizza anche il contributo dei carichi termici interni, pari a 10, 20 e 30 W/m² (esclusi i carichi dovuti all'illuminazione).

5.3.4 Risultati conseguiti

I risultati di questa attività di ricerca sono mostrati per una città contraddistinta dalla stagione estiva molto calda (Palermo) e per un'altra con inverno piuttosto rigido (Milano).

Nel caso di Palermo, ad esempio, l'analisi energetica mette in luce che il caso migliore è quello in cui l'involucro edilizio è tutto isolato eccetto il pavimento di terra (proposta B, caso con riquadro verde); mentre, quello peggiore è quello in cui l'involucro edilizio è tutto isolato (proposta C) (Fig. 5.3.4.1).

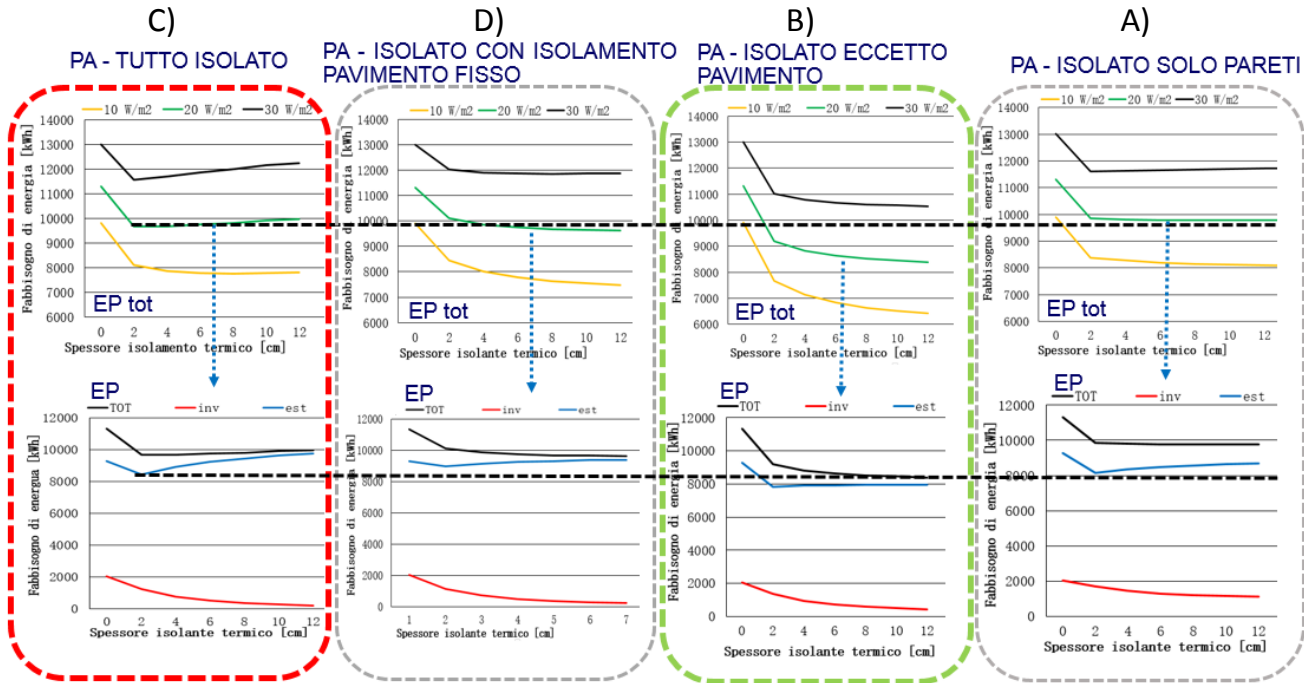


Fig. 5.3.4.1: Domanda di energia primaria al variare del livello di isolamento termico per la città di Palermo. Analisi annuale in alto, analisi stagionale in basso

Analizzando il caso peggiore (caso C con riquadro rosso), si può notare che, il fabbisogno energetico relativo a carichi termici interni pari a 20 W/m^2 (curva di colore verde), per spessore di isolante termico maggiore di 2 cm, tende ad aumentare. Questo si spiega, osservando i diagrammi relativi all'analisi stagionale (diagrammi nella parte bassa della Fig. 5.3.4.1, che evidenziano un andamento sempre decrescente della domanda di riscaldamento (curva rossa) all'aumentare dello spessore di isolante termico ed un andamento crescente della domanda di climatizzazione estiva (curva azzurra) a partire da 2 cm di spessore di isolante termico.

Nel caso migliore (caso B con riquadro verde), invece, è possibile vedere che più lo spessore di isolante cresce (di pareti e tetto), maggiore è la riduzione del fabbisogno energetico.

All'aumentare dei carichi termici interni, si nota che il fabbisogno energetico annuale cresce, a causa dell'aumento della domanda di raffrescamento.

Riassumendo, è possibile notare che la soluzione migliore sotto il profilo energetico è quella con involucro edilizio isolato eccetto il pavimento di terra. Il risultato è valido per tutti i tre i livelli di carichi termici interni considerati. Si può notare inoltre che:

1. in inverno la richiesta energetica diminuisce all'aumentare dello spessore dell'isolante termico;
2. in estate, a circa 2 cm di spessore, si ha un'inversione della curva del fabbisogno energetico;

- globalmente (costi energetici per climatizzazione invernale ed estiva), la curva segue l'andamento della richiesta energetica estiva in quanto, a Palermo, la climatizzazione estiva pesa maggiormente rispetto a quella invernale.

Dunque, aumentare lo spessore di isolante diventa penalizzante per climi caldi o miti, poiché in alcuni casi (soprattutto in presenza di elevati carichi termici interni) aumentano eccessivamente i consumi energetici connessi alla climatizzazione estiva.

Con riferimento alla valutazione del livello ottimale in funzione dei costi, ossia nel caso di un approccio multi-obiettivo, che tiene conto di energia, emissioni e costi, impiegando l'analisi macroeconomica, si può evincere che la soluzione ottimale risulta essere sempre il caso B, ossia il caso in cui l'involucro edilizio è tutto isolato eccetto il pavimento di terra.

Tale risultato è valido sia per la città di Palermo che per quella di Milano. Nella prima città, lo spessore ottimale, in funzione dei costi, ricade nel range 2-4 cm (nel caso di carichi interni di 20 W/m^2) (Fig. 5.3.4.2); invece, a Milano, lo spessore più adeguato è pari a circa 8 cm (Fig. 5.3.4.3). La Fig. 5.3.4.4 riporta l'analisi, considerando i carichi termici interni pari a 10 W/m^2 . Esiti analoghi sono ottenuti, mediante la valutazione del DPB (Figs. 5.3.4.5 – 5.3.4.6). Anche tale analisi conferma, ad esempio, che per la città di Palermo gli spessori ottimali sono circa 2-4 cm.

L'analisi del comfort termico, valutando in un giorno tipico estivo, l'indice PMV nell'ufficio 6, che risulta essere uno degli ambienti più sfavoriti, mette in luce che le condizioni di comfort sono accettabili per Palermo (spessore isolante compreso nel range 2-4 cm) (Tab. 5.3.4.1); invece, nella città di Milano, analizzando l'indice PMV dell'ufficio 1, in un giorno tipico invernale, è possibile notare (Tab. 5.3.4.2) che la mancanza di isolamento termico sul pavimento di terra determina un livello di comfort termico non accettabile (PMV quasi sempre minore di -0.7 il che equivale a sensazione di freddo).

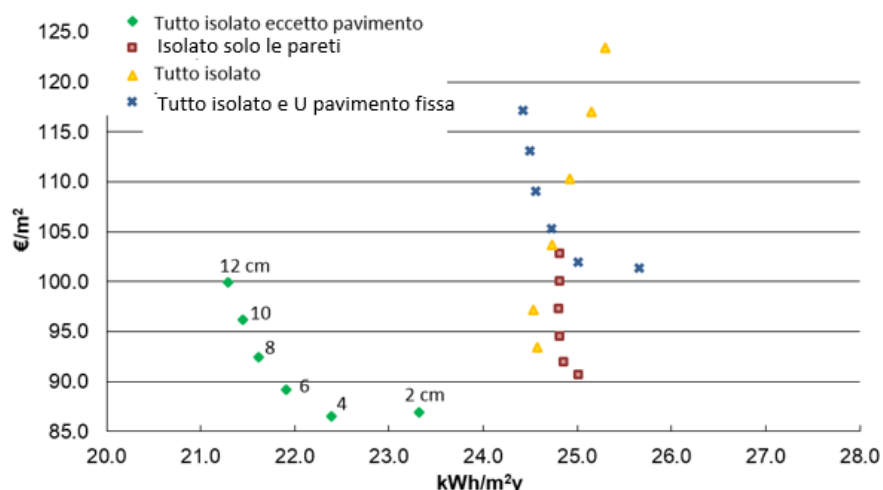


Fig. 5.3.4.2: Risultati dell'analisi del cost-optimal - 20 W/m^2 , Palermo

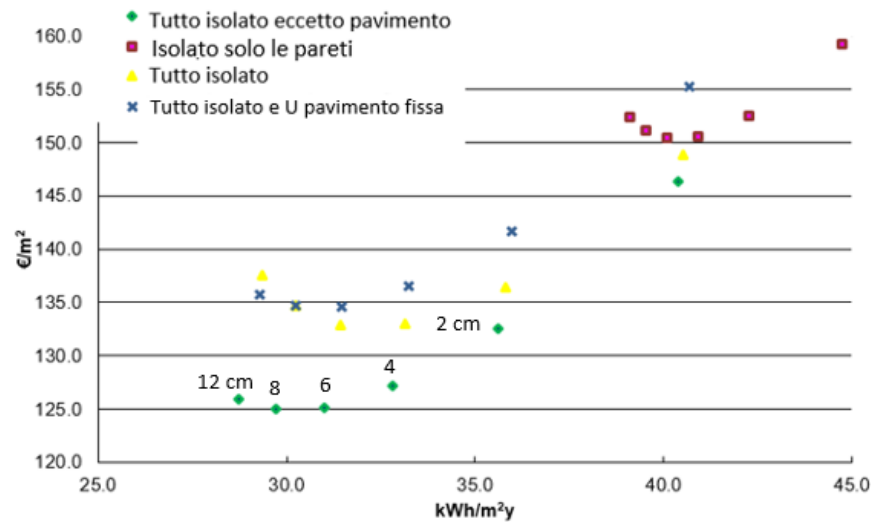


Fig. 5.3.4.3: Risultati dell'analisi del cost-optimal - 20 W/m², Milano

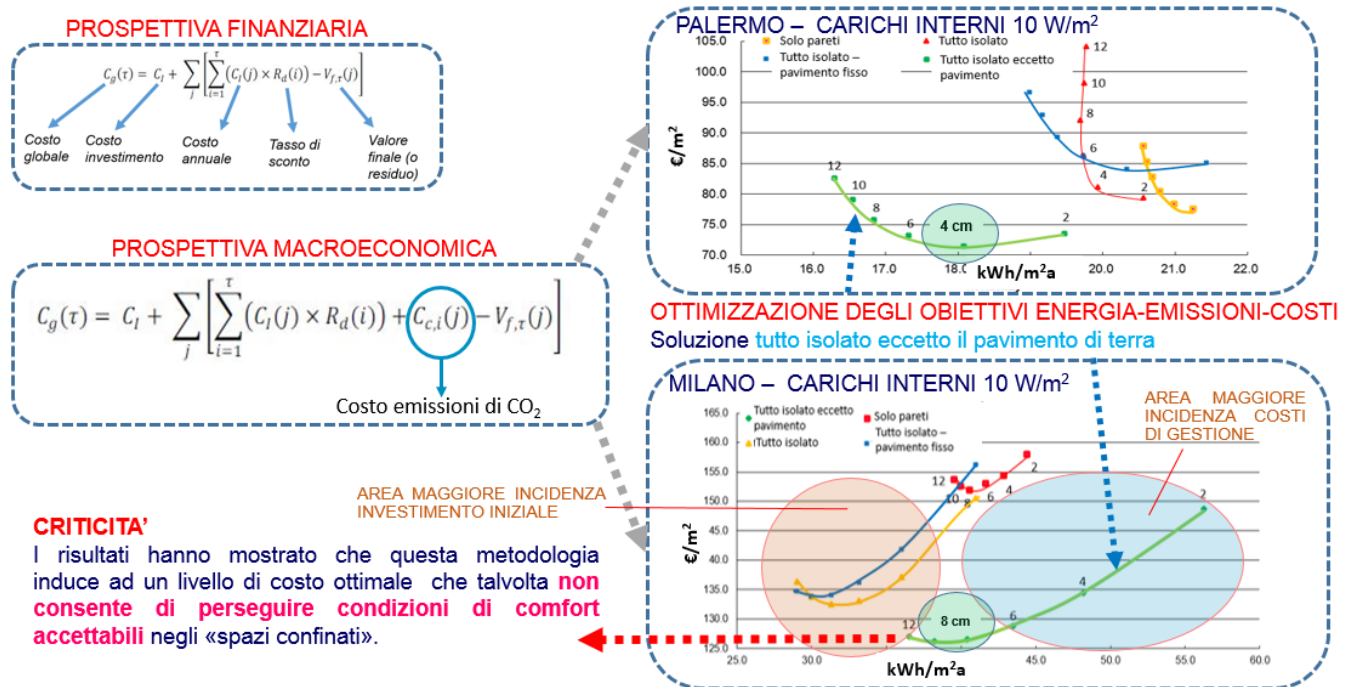


Fig. 5.3.4.4: Risultati della metodologia del "Cost-optimal" con prospettiva macroeconomica, carichi termici interni pari a 10 W/m²

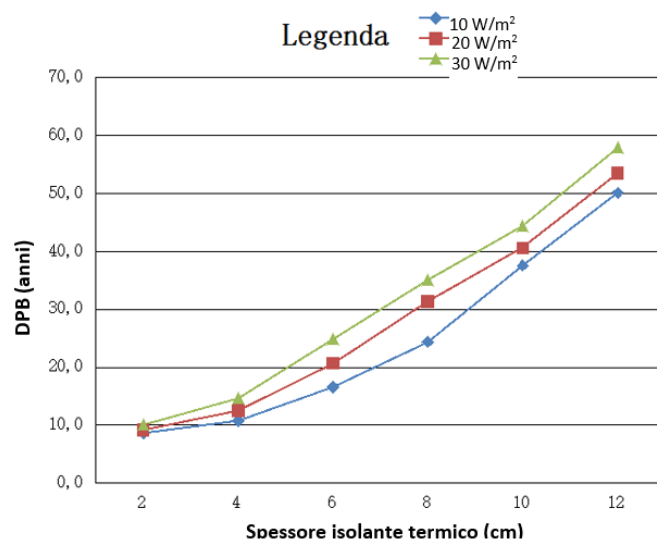


Fig. 5.3.4.5: Discounted Pay Back in funzione dello spessore di isolante termico - caso B - Palermo

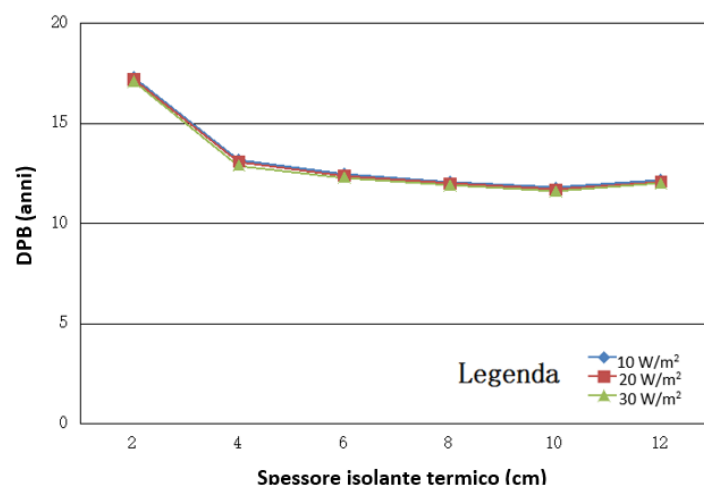


Fig. 5.3.4.6: Discounted Pay Back in funzione dello spessore di isolante termico - caso B - Milano

Azioni	Fanger PMV					
	h.8	h.10	h.12	h.14	h.16	h.18
CASO A	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32
CASO B	0,26	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27
CASO C	0,28	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29

Tab. 5.3.4.1: Indice di comfort PMV per l'ufficio 6 – giorno 20 agosto – 4 cm di isolamento termico, Palermo

Azioni	Fanger PMV					
	h.8	h.10	h.12	h.14	h.16	h.18
CASO A	-1,40	-1,19	-1,11	-1,06	-1,03	-1,01
CASO B	-1,29	-1,03	-0,93	-0,89	-0,86	-0,84
CASO C	-0,88	-0,67	-0,62	-0,59	-0,57	-0,56

Tab. 5.3.4.2: Indice di comfort PMV per l'ufficio 1 – giorno 21 gennaio – 8 cm di isolamento termico, Milano

Nella città de il Cairo, che si contraddistingue per un clima molto caldo in estate e mite in inverno, la posa in opera di strati di materiale coibente non è mai conveniente (il fabbisogno energetico minore si ottiene in assenza di isolante), come è mostrato dalla Fig. 5.3.4.7, che riporta i fabbisogni stagionali del caso B (isolamento su pareti e copertura, eccetto il pavimento di terra). In funzione di tali risultati, si è ritenuto non conveniente procedere alla valutazione del cost-optimal mediante la nuova metodologia.

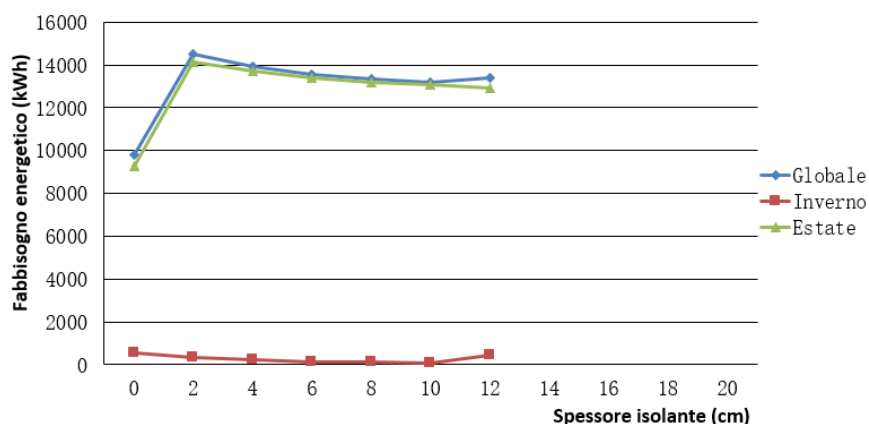


Fig. 5.3.4.7: Andamento del fabbisogno energetico al variare dello spessore di isolante termico – città de il Cairo

In base a questo studio, è possibile notare che le disposizioni legislative, sia quelle attuali (DM 26/06/15 di attuazione della L. 90/2013) che quelle precedenti (DPR 59/09), in particolare nelle zone climatiche contraddistinte da stagione estiva molto calda, inducono ad indirizzare verso quelle soluzioni con spessori di isolante termico maggiori rispetto alla soluzione che consente di conseguire l'optimal-cost che, ad esempio, a Palermo risulta essere pari a 4 cm per le pareti e per la copertura (nel caso di carichi interni pari a 10 W/m^2).

Questa attività ha messo in luce le criticità derivanti dalle nuove disposizioni legislative e normative che puntano quasi sempre a “privilegiare” la minimizzazione della domanda di energia per il riscaldamento, penalizzando, talvolta, quella per il raffrescamento. La Tab. 5.3.4.3 riporta i limiti previsti per la trasmittanza termica sia delle attuali disposizioni, sia di quelle precedenti.

I risultati (Fig. 5.3.4.8) mostrano che le disposizioni della nuova legislazione in materia di efficienza energetica negli edifici (DM 26/06/2015, cosiddetto “Decreto Requisiti minimi”, entrato in vigore da Ottobre 2015, di attuazione della L. 90/2013) prendono ancor di più le

distanze dal punto di ottimo, rispetto al precedente riferimento (DPR 59/09, oggi abrogato), particolarmente nel caso di città con estate calda dominante, come Palermo.

Ciò induce a indagare ulteriormente su questa questione, in quanto, come si è visto, l'aumento dello spessore di isolante termico è opportuno per la stagione invernale, mentre per quella estiva può essere molto sfavorevole, soprattutto nelle località caratterizzate da estati molto calde (come Palermo).

PALERMO		
Trasmittanza termica stazionaria U_e e periodica Y (W/m^2K)	DPR 59/09	Decreto "Requisiti minimi" DM 26.06.2015
U_{PARETI}	0.48	0.45 – 0.40
U_{TETTO}	0.38	0.34 – 0.32
$U_{FINESTRE}$	3.0	3.2 – 3.0
$U_{PAVIMENTO\ TERRA}$	0.49	0.48 – 0.42
Y_{PARETI}	0.12	0.10
Y_{TETTO}	0.20	0.18

Tab. 5.3.4.3: Comparazione tra le due disposizioni legislative - valori limite della trasmittanza termica unitaria di componenti opachi e trasparenti dell'involucro edilizio per Palermo nel caso di riqualificazione energetica

Si tenga, inoltre, presente un'altra disposizione legislativa vigente, qui di seguito riportata, al fine di limitare le richieste energetiche per la climatizzazione estiva. Nelle zone climatiche A, B, C, D, E e per tutti gli edifici, eccetto le categorie E.6 ed E.8, caratterizzate da un valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva maggiore o uguale di 290 W/m^2 , sono previste le seguenti alternative [63]:

- per le pareti opache verticali (eccetto quelle a nord-ovest/nord/nord-est):
 - massa superficiale $M_s > 230\text{ kg/m}^2$;
 - trasmittanza termica periodica $Y_{IE} < 0.10\text{ W/m}^2K$ (il limite era invece pari a 0.12 W/m^2K in base al DPR 59/09);
- per le pareti opache orizzontali ed inclinate:
 - trasmittanza termica periodica $Y_{IE} < 0.18\text{ W/m}^2K$ (il limite era invece pari a 0.20 W/m^2K in base al DPR 59/09).

L'edificio di riferimento simulato con i livelli prestazionali richiesti dal DPR 59/09 e dal DM 26/06/2015 rispetta anche i limiti della trasmittanza termica periodica sopra riportati.

Inoltre, è stato individuato un altro aspetto critico. I risultati mostrano che questa metodologia innovativa induce ad un livello di costo ottimale che non sempre consente però di perseguire condizioni di comfort accettabili negli ambienti. Questo punto è stato analizzato nel prossimo paragrafo.

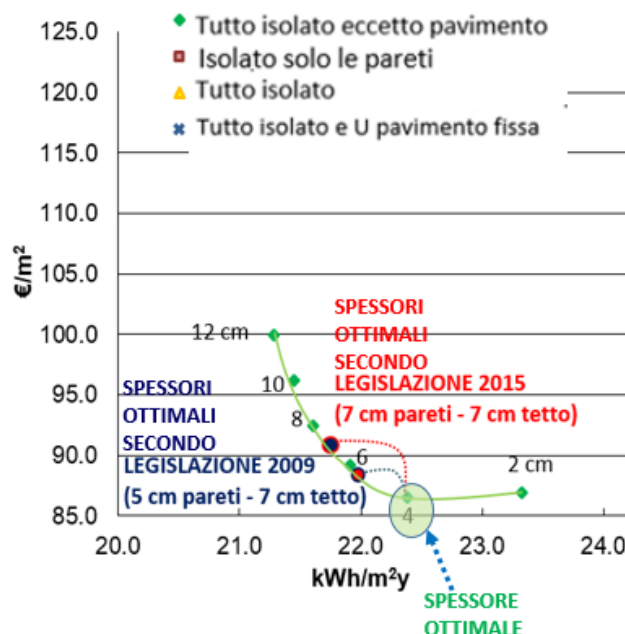


Fig. 5.3.4.8: Disposizioni della legislazione in materia di efficienza energetica in edilizia conducono ad allontanarsi dal valore ottimale di spessore di isolante (valutato in base alla metodologia del “cost-optimal”)

5.3.5 Una proposta di integrazione al calcolo di base della metodologia “Cost-optimal”

La continua evoluzione normativa in ambito energetico-ambientale potrebbe distogliere l’attenzione dal principale fine dell’edificio, ovvero quello di rendere, innanzitutto, il luogo dove l’uomo vive o lavora confortevole. Ad esempio, dai risultati ottenuti con l’innovativa metodologia del “Cost-optimal”, è stato possibile osservare che le soluzioni più efficienti dal punto di vista energetico-economico-ambientale, potrebbero anche non essere le più appropriate dal punto di vista del comfort per gli utenti. Infatti, i risultati mostrano che sia per la città di Palermo che per quella di Milano, il caso che consente di ottenere un costo globale più basso è il caso di edificio “tutto isolato eccetto il pavimento di terra”, con un risultato migliore rispetto al caso “tutto isolato”. In particolare, il primo caso induce maggiori costi gestionali, mentre il secondo richiede un maggior investimento iniziale.

In realtà, mentre ciò diviene conveniente a Palermo, in particolare nella stagione estiva, perché il solaio di terra si trasforma in un elemento che “scarica” energia termica verso il terreno, a Milano, invece, l’assenza di isolamento sul pavimento di terra sarebbe troppo penalizzante dal punto di vista del comfort termico ottenuto nella stagione invernale.

Pertanto, volendo dare il giusto peso anche al comfort, si è pensato che non è possibile paragonare le due soluzioni (con e senza isolante termico sul pavimento di terra) solo dal punto di vista energetico, dei costi e delle emissioni, in quanto, a Milano, il caso di edificio tutto isolato eccetto il pavimento di terra, anche in base ai risultati delle simulazioni effettuate, non consente

di creare condizioni accettabili di comfort (indice di comfort PMV “Predicted Mean Vote”, cioè voto medio previsto in un giorno tipico invernale, 21 gennaio, pari a -0.97).

Da ciò è nata la proposta di integrare l’equazione per il calcolo del costo globale (prevista dal Regolamento delegato EU 244/2012) (Eq. 5.17) con un coefficiente moltiplicativo, F_{PMV} (Eq. 5.18), valutato in funzione dell’indice di comfort PMV, che permette di ottenere altre curve non corrispondenti a quelle risultanti dal calcolo di base della metodologia comparativa.

La proposta di cui sopra, è stata considerata, dunque, perché i risultati mostrano che, a volte, la soluzione ottimale in funzione dei costi non sempre determina un ambiente confortevole per l’utenza.

Il coefficiente diviene riduttivo nei casi in cui il comfort è accettabile ($PMV \pm 0.7$) e si trasforma in coefficiente amplificativo nei casi in cui il comfort supera il livello di accettabilità, in modo tale da poter rendere confrontabili le diverse soluzioni (anche dal punto di vista del comfort) (Figs. 5.3.5.1 – 5.3.5.5). Ad esempio, nel caso di un PMV accettabile (pari a 0.5), si applicherà un coefficiente riduttivo pari a 0.9; invece, nel caso di un PMV non accettabile (pari a 1.5) verrà applicato un coefficiente amplificativo pari a 1.2 (Fig. 5.3.5.1).

CALCOLO BASE

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j)R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (5.17)$$

PROPOSTA

$$C_g(\tau) = \left\{ C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j)R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right] \right\} \times F_{PMV} \quad (5.18)$$

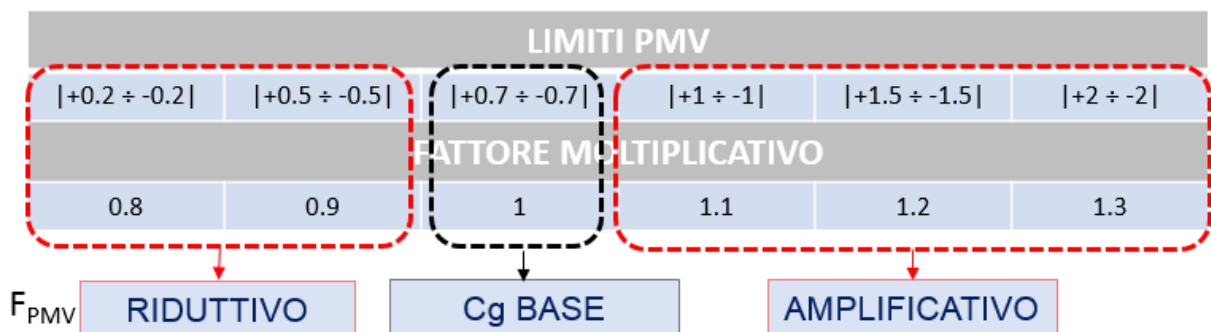


Fig. 5.3.5.1: Proposta di modifica della metodologia del “Cost-optimal” in funzione del comfort termico (indice PMV)

Dunque, il coefficiente, ottenuto in base al valore assoluto dell'indice PMV (relativo alla stagione predominante), consente di amplificare il costo globale di una soluzione non ottimale in termini di comfort.

Analizzando il caso di Milano (Figs. 5.3.5.2 – 5.3.5.3), l'edificio tutto isolato presenta un indice PMV medio, in un giorno tipico invernale (21 gennaio), pari a -0.65, mentre l'edificio tutto isolato eccetto il pavimento di terra presenta un PMV medio pari a -0.97. Pertanto, al caso più sfavorevole dal punto di vista del comfort ambientale, ossia quello con l'involucro edilizio tutto isolato eccetto il pavimento, come si può notare, dalla Fig. 5.3.5.3, si propone di applicare un coefficiente F_{PMV} amplificativo pari a 1.1.

L'applicazione del coefficiente F_{PMV} (Fig. 5.3.5.4) fa traslare la curva blu (ottenuta con il calcolo di base dell'approccio macroeconomico) nella posizione della curva azzurra in corrispondenza di livelli di costo maggiori: ne deriva una minore prestazione complessiva (consumi energetici, costi e comfort termico) per questa soluzione rispetto all'approccio classico del "cost-optimal", che non tiene conto del comfort termico. Tali considerazioni valgono, confrontando la curva azzurra (edificio tutto isolato eccetto il pavimento di terra), ottenuta applicando il F_{PMV} , con la curva magenta (caso involucro edilizio tutto isolato).

Invece, come si può evincere sempre dalla Fig. 5.3.5.5, per il caso di Palermo, la soluzione ottimale in funzione dei costi rimarrà quella in cui l'edificio non presenta l'isolamento termico sul pavimento di terra. Infatti, il fattore F_{PMV} in entrambe le soluzioni (involucro edilizio con o senza isolante sul pavimento di terra) risulta essere pari a 0.9 (quindi si ottiene una traslazione simultanea delle due curve verso livelli di costo più esigui). In tal caso, in linea con i risultati energetici, il solaio di terra diviene un elemento che "scarica" l'energia termica verso il terreno e, quindi, è conveniente non isolarlo.

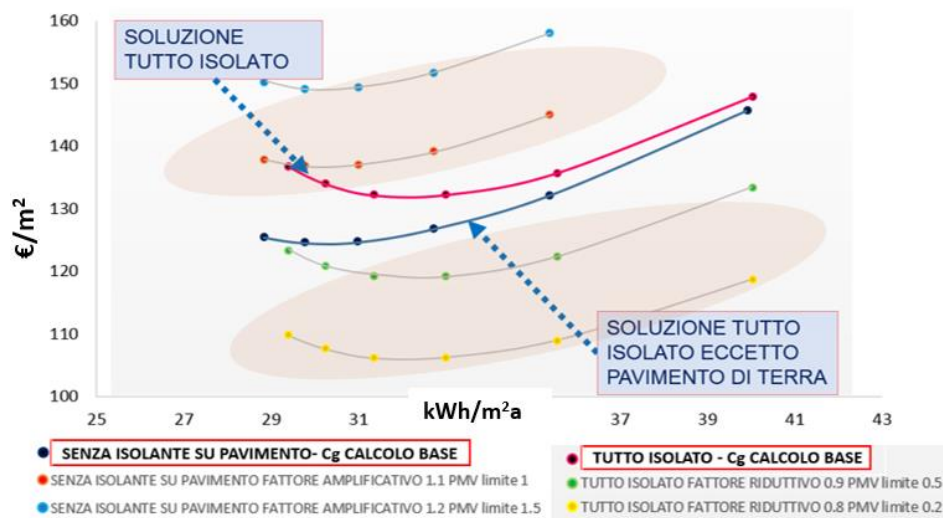


Fig. 5.3.5.2: Risultati ottenuti con il calcolo di base del "Cost-optimal" – Milano

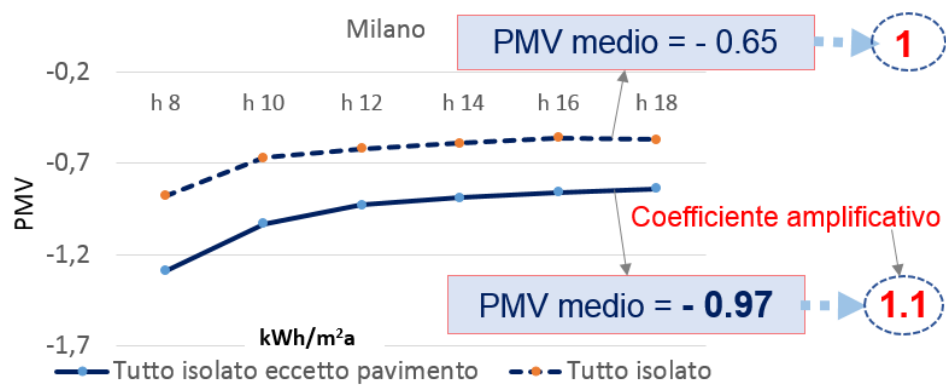


Fig. 5.3.5.3: Indice di comfort PMV con relativi coefficienti correttivi proposti - Milano

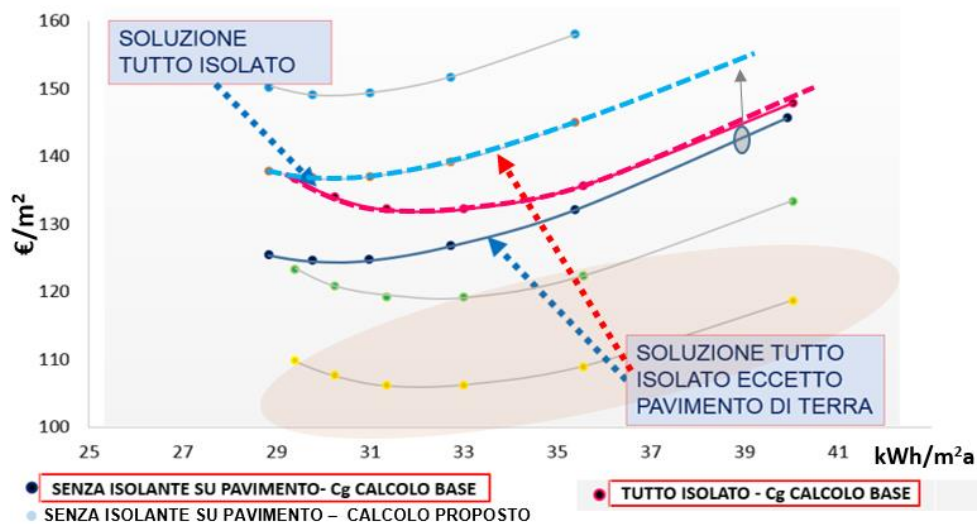


Fig. 5.3.5.4: Risultati ottenuti con il calcolo proposto di modifica della metodologia del “Cost-optimal” – Milano

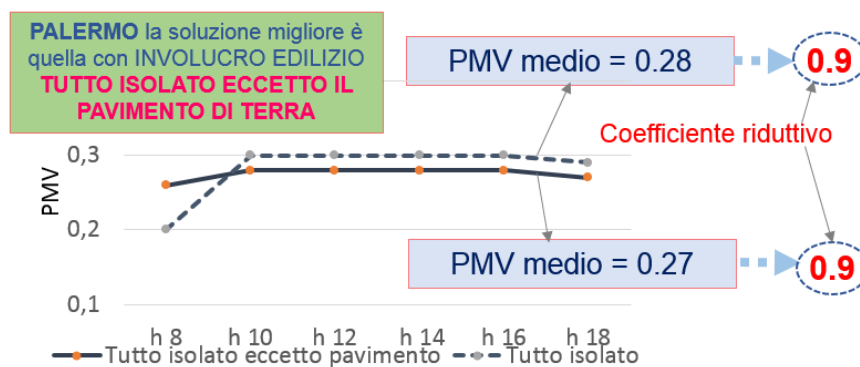


Fig. 5.3.5.5: Indice di comfort PMV con relativi coefficienti correttivi proposti – Palermo

5.4 Ottimizzazione degli impianti di climatizzazione mediante l'inserimento di recuperatori di calore aria-aria o terra-aria

5.4.1 Introduzione

Questa attività di ricerca è volta a valutare gli effetti di alcune tipologie di scambiatori di calore sulle richieste energetiche stagionali ed annuali di tre edifici di riferimento determinati in funzione della località.

Nella valutazione dei carichi termici di un edificio, come visto precedentemente, concorrono le dispersioni termiche per trasmissione, per ventilazione ed anche i guadagni termici gratuiti sia solari, sia interni.

Al giorno d'oggi i carichi per trasmissione sono sempre più contenuti, grazie alle rigide disposizioni legislative e normative nel settore dell'efficienza energetica in edilizia; invece quelli per ventilazione diventano tanto più elevati quanto più si differenziano i valori della temperatura dell'aria esterna da quella interna e quanto più numerosi sono i ricambi d'aria previsti.

I ricambi d'aria sono regolamentati in funzione della destinazione d'uso dell'edificio ed in funzione della tipologia dei locali con il fine di migliorare le condizioni di purezza dell'aria e di salubrità e, quindi, concorrere ad un maggiore benessere negli ambienti.

Sono stati studiati gli scambiatori terra-aria e quelli aria-aria, in differenti località europee, per determinare la soluzione impiantistica ottimale in funzione dell'obiettivo da conseguire, ossia minimizzare il consumo energetico per il raffrescamento estivo, quello per il riscaldamento, oppure la somma di entrambi. Gli scambiatori sono stati opportunamente inseriti all'interno di idonei impianti di climatizzazione invernale/estiva.

La temperatura del terreno è più favorevole rispetto a quella dell'aria esterna, ovvero nella stagione invernale è più alta e, quindi, si ha un preriscaldamento dell'aria da immettere negli ambienti, mentre in estate la temperatura del suolo è più bassa rispetto a quella dell'aria esterna e ciò induce ad un preraffrescamento dell'aria di immissione nell'edificio.

Riguardo agli scambiatori terra-aria, come analisi preliminare è stato impiegato il software GAEA [71], basato sul calcolo analitico dello scambio energetico tra il terreno e l'aria nei condotti.

Tutte le altre analisi sono state svolte impiegando il codice di calcolo EnergyPlus [67].

Sono stati valutati i consumi di energia elettrica connessi alla climatizzazione invernale ed a quella estiva, con e senza l'ausilio degli scambiatori di calore aria-aria e terra-aria.

I risultati ottenuti mostrano l'efficacia dello scambiatore aria-aria e di quello terra-aria sia in regime estivo, che in quello invernale ed annuale. In particolare, lo scambiatore aria-aria induce migliori prestazioni energetiche in regime invernale, mentre la presenza dello scambiatore terra-aria consente di ridurre maggiormente il fabbisogno energetico estivo.

L'attività di ricerca ha anche previsto una soluzione impiantistica che prevede l'utilizzo di entrambi gli scambiatori di calore facendoli funzionare uno in inverno (scambiatore aria-aria) e l'altro in estate (scambiatore terra-aria): tale configurazione consente di conseguire i più alti livelli di risparmio energetico su base annuale.

5.4.2 L'edificio oggetto di indagine

L'edificio oggetto di studio (Fig. 5.4.2.1) di questa attività di ricerca presenta le prestazioni energetiche definite sulla base di recenti disposizioni legislative in materia di efficienza energetica ed in funzione delle condizioni climatiche delle città in cui sorge l'edificio, in particolare in base al valore dei gradi-giorno invernali (Heating Degree Day, HDD) (Tab. 5.4.2.1).

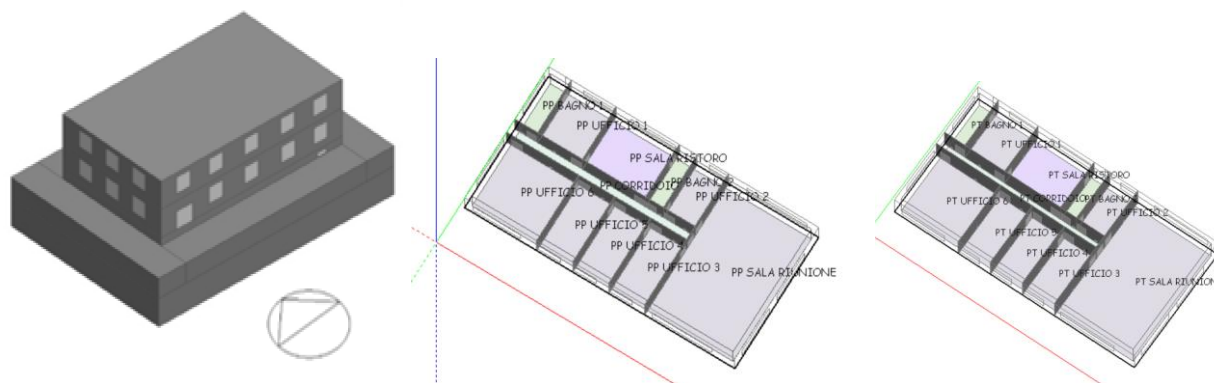


Fig. 5.4.2.1: Edificio di riferimento

L'edificio si caratterizza per la presenza di 3 livelli, uno interrato, adibito a garage, e due fuori terra, e le caratteristiche dell'involucro edilizio sono riportate in Tab. 5.4.2.2.

L'impianto di riscaldamento/climatizzazione estiva è costituito da un impianto ad aria primaria e fan-coils alimentati da una pompa di calore elettrica aria-acqua (Tab. 5.4.2.3).

In Design Builder è stato modellato l'edificio e lo schema impiantistico, con la sezione “dettagliata”, come riportato in Fig.5.4.2.2. Si evidenzia che i vari locali rientrano nel gruppo di zona.

HDD			
0 - 1300	1301 - 2500	2501 - 3500	> 3500
PALERMO	ROMA	PARIGI	STOCCOLMA
SIVIGLIA	MILANO	LONDRA	COPENAGHEN
ATENE		BERLINO	

Tab. 5.4.2.1: Gradi-giorno invernali della città considerate (evidenziate in azzurro)

	TRASMITTANZE [W/m²K]		
	PALERMO	MILANO	BERLINO
U_{parete}	0.257	0.240	0,230
U_{tetto}	0.150	0.130	0,130
$U_{\text{pavimento}}$	0.400	0.240	0,220
U_{finestra}	1.500	1.300	1,300

Tab. 5.4.2.2: Caratteristiche termiche dei componenti edilizi

Località	Stagione riscaldamento	Ore funzionamento impianto	T interna	CO P	Stagione raffrescamento	Ore funzionamento impianto	T interna	EER
Palermo	1 dic – 31 mar	8 h (8-12 e 16-20)	20°C	2.8	1 mag – 30 set	10 h (9-19)	26°C	2.5
Milano	15 ott – 15 apr	14 h (7-19)	20°C	2.5	1 giu – 15 set	7 h (11-18)	26°C	2.8
Berlino	15 ott – 30 apr	14 h (7-19)	20°C	2.5	1 giu – 15 set	7 h (11-18)	26°C	2.8

Tab. 5.4.2.3: Principali dati relativi agli impianti

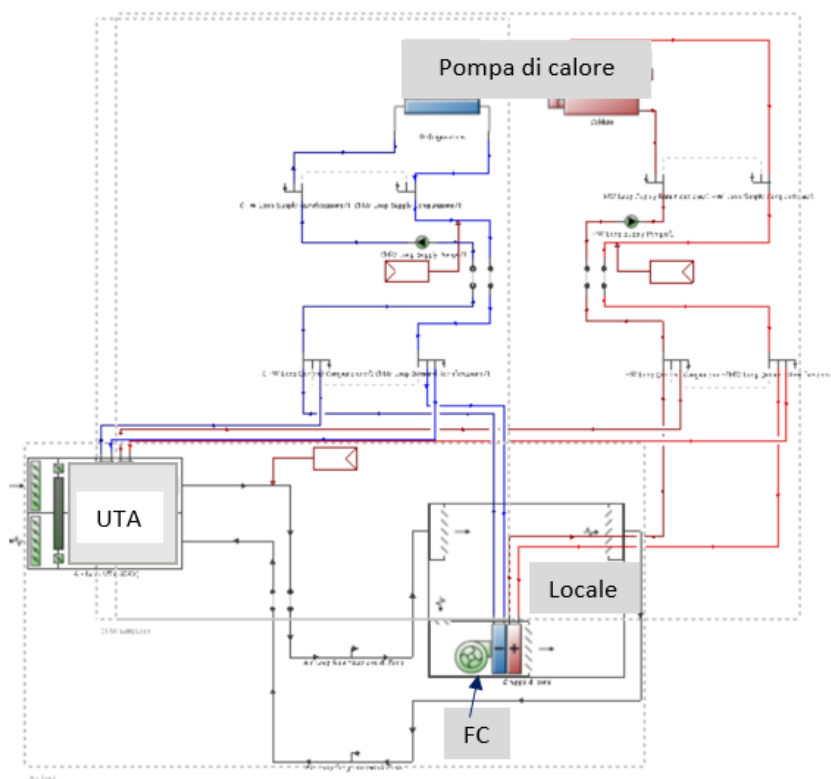


Fig. 5.4.2.2: Schema impiantistico realizzato con la sezione dettagliata di Design Builder.

5.4.3 Scambiatori di calore aria-aria

Il mantenimento delle condizioni termo-igrometriche ottimali all'interno degli edifici mediante l'impiego di unità di trattamento dell'aria (UTA) comporta generalmente consumi energetici notevoli.

Il livello entalpico dell'aria immessa negli ambienti dipende dal fabbisogno energetico dell'involucro edilizio, correlato al clima in cui insiste l'edificio, alla geometria, ai materiali, ai carichi interni, alle infiltrazioni d'aria, ecc. Come visto in precedenza esistono varie soluzioni passive per ridurre il fabbisogno energetico dell'involucro edilizio, ma esistono altrettante soluzioni attive per migliorare l'efficienza energetica dei sistemi impiantistici.

La sezione HVAC in EnergyPlus è molto più complessa, rispetto al modello “edificio”, a causa delle interconnessioni delle diverse parti di un sistema impiantistico.

Un impianto di riscaldamento/climatizzazione è, quindi, considerato come un sistema costituito da diversi componenti connessi tra loro mediante elementi di congiunzione, quali: condotti, tubazioni, ecc.

Ogni componente ha sia un nodo d'ingresso che uno d'uscita. I nodi sono punti in cui le proprietà dei vari fluidi termovettori vengono valutati e trasmessi ai componenti successivi.

I diversi componenti sono collegati, in modo tale da formare vari cicli, che vengono simulati dal codice di calcolo.

La Fig. 5.4.3.1 mostra un esempio generico del concetto loop-nodo. La creazione di un tale schema è molto importante e potrebbe essere creato con un'interfaccia grafica (come in questo caso mediante Design Builder).

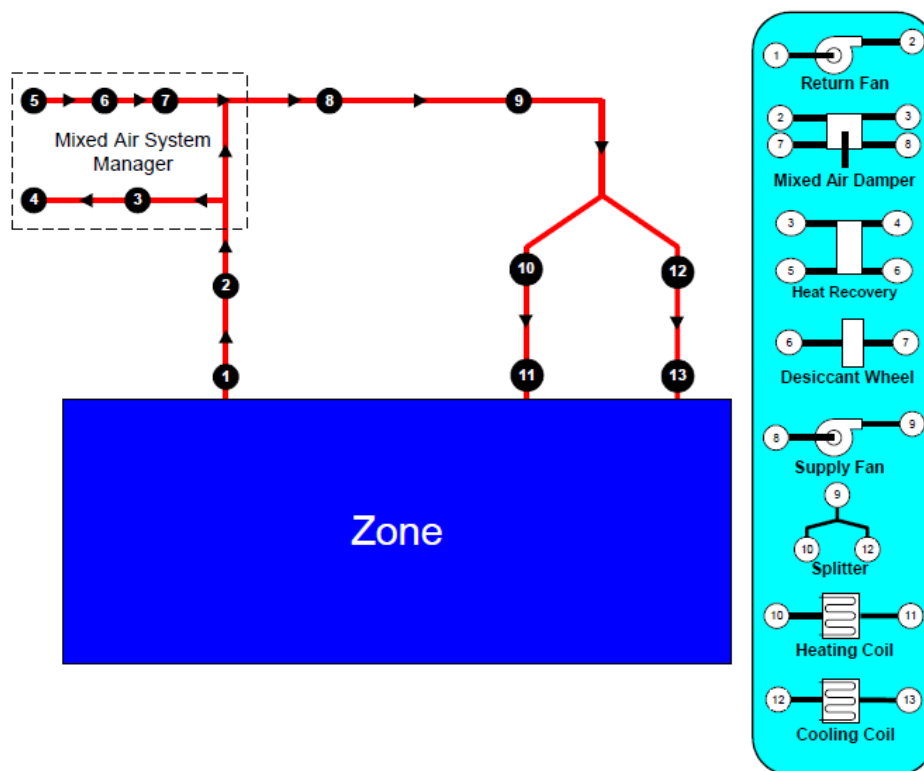


Fig. 5.4.3.1: Schema impiantistico generico previsto nel codice Energy Plus

Per poter contenere l'alta richiesta energetica connessa agli impianti ad aria (o a quelli aria-acqua per la parte relativa all'aria primaria), il recuperatore di calore diviene uno dei pochi componenti in grado di soddisfare l'esigenza dei ricambi d'aria e di contenere lo spreco energetico.

I recuperatori di energia termica sono scambiatori di calore che utilizzano l'aria esausta in espulsione dal locale condizionato per preriscaldare (in inverno) o preraffrescare (in estate) il flusso d'aria esterno di rinnovo da immettere in ambiente, consentendo, dunque, il recupero di energia che, in assenza dello scambiatore, andrebbe perduta.

Lo scopo di questo lavoro è quello di confrontare la domanda di energia connessa alla climatizzazione invernale ed estiva di un edificio ad uso uffici in cui si prevede l'installazione di un impianto ad aria primaria e fan-coils, con e senza l'ausilio del scambiatore aria-aria.

Energy Plus consente di modellare due tipologie di scambiatori aria-aria:

1. a piastre;
2. rotativi.

Il seguente lavoro ha previsto l'impiego di uno scambiatore di calore a piastre.

Tali scambiatori permettono di trasferire l'energia termica tra due flussi d'aria sotto l'azione di una differenza di temperatura.

È possibile scambiare sia calore sensibile (solo quando le piastre sono fatte di un materiale non poroso, come l'alluminio), che calore latente quando il materiale delle piastre è poroso.

Si fa distinzione tra recuperatori di calore e gruppi di recupero di calore; questi ultimi sono costituiti dal recuperatore, ma anche da una serie di accessori quali filtri, dispositivi di preriscaldamento, serrande, apparecchiature di regolazione, che vengono assemblati in un cassone avente flange di raccordo alle canalizzazioni.

Il rendimento di uno scambiatore di calore (Eq. 5.19) è definito dalla norma ASHRAE Standard '84 come rapporto tra l'energia (o umidità) effettivamente trasmessa ed i valori massimi trasmissibili.

$$\eta = W_i(X_{iu} - X_{ii}) / W_{\min}(X_{ei} - X_{ii}) = W_e(X_{ei} - X_{eu}) / W_{\min}(X_{ei} - X_{ii}) \quad (5.19)$$

dove:

η = efficienza (su calore sensibile, latente o totale)

X_{ii} = temperatura o umidità o entalpia ingresso immissione

X_{iu} = temperatura o umidità o entalpia uscita immissione

X_{ei} = temperatura o umidità o entalpia ingresso espulsione

X_{eu} = temperatura o umidità o entalpia ingresso espulsione

W_i = portata massica di immissione

W_e = portata massica di espulsione

W_{\min} = la minore tra W_i e W_e

La perdita di carico di un recuperatore è la differenza di pressione totale, misurata su ciascuno dei due flussi, fra l'ingresso e l'uscita dal recuperatore. Questa perdita di carico deve essere compensata dalla prevalenza del ventilatore.

Se l'opzione "recupero di calore" viene selezionata in EnergyPlus, l'UTA incorporerà un dispositivo di recupero aria-aria sensibile e latente in grado sia di riscaldare che raffrescare il flusso d'aria da immettere negli ambienti, utilizzando l'energia termica proveniente dall'aria

esausta in uscita dall'edificio. Allo scambiatore di calore sono dedicati i nodi n. 3-4-5-6, come mostrato in Fig. 5.4.3.1.

I recuperatori statici a piastre sono costituiti da diversi strati piani distanziati tra loro. Il flusso di espulsione e quello di immissione vengono mantenuti separati da apposite sigillature e si ha il trasferimento di energia termica direttamente dal flusso a temperatura più calda a quello a temperatura più fredda (Fig. 5.4.3.2).

I meccanismi di trasmissione del calore in gioco sono convezione e conduzione, il primo molto più piccolo rispetto al secondo meccanismo.

Il materiale con cui le piastre vengono comunemente realizzate è l'alluminio, noto per le sue caratteristiche di resistenza alla corrosione, di facilità realizzativa e di durata. Nel caso di ambienti più corrosivi l'alluminio può essere protetto con una vernice acrilica; mentre, in presenza di alte temperature (oltre i 200 °C) e dove il costo non rappresenti un fattore chiave vengono impiegate leghe di acciaio inox.

Inoltre, vi è la possibilità di simulare il controllo di by-pass del recuperatore di calore, che ha il fine di ottimizzare l'utilizzo del componente, ovvero di utilizzarlo quando si rende necessario (quando vi è un'opportuna differenza di temperatura tra l'aria esterna e quella di espulsione) e di by-passarlo nel momento in cui non è necessario. Per conseguire idonei risultati, è consigliabile utilizzare il by-pass secondo un opportuno controllo della temperatura d'uscita dell'aria di immissione.

Lo scambio di calore tra i flussi d'aria si verifica ogni volta che il programma prevede la disponibilità del flusso di immissione e di espulsione.

Il recupero di calore può essere utilizzato in combinazione con un economizzatore lato aria convenzionale per cui lo scambio termico, nel recuperatore, è sospeso quando è attivo l'economizzatore. In tal caso il flusso d'aria viene completamente bypassato intorno allo scambiatore di calore a piastra fissa.

In generale, quando si tiene conto anche di un economizzatore lato aria, il set point, per il controllo della temperatura d'uscita dell'aria di immissione, viene forzato ad essere uguale alla temperatura del bulbo secco limite minimo dell'economizzatore.

È, anche, possibile sospendere lo scambio termico nel componente allo scopo di fornire, in assenza dell'economizzatore, il funzionamento in free cooling.

Durante la stagione invernale, l'aria di scarico umida entrante nel recuperatore può formare la brina sulle superfici, riducendo il flusso d'aria ed il recupero energetico. Esistono diversi metodi per controllare o eliminare la formazione di brina, e le diverse tipologie possono essere modellate in EnergyPlus. In questo caso, il controllo del gelo ha la priorità rispetto al controllo della temperatura in uscita.

Quando si seleziona “sì” per il controllo della temperatura d'uscita dell'aria dallo scambiatore, è possibile inserire la temperatura nominale da impiegare per il controllo del funzionamento del componente. Questo diviene importante perché in generalmente, negli ambienti climatizzati sono presenti diverse sorgenti (persone, macchinari, illuminazione, ecc.), che apportano una quantità di energia supplementare al sistema. Nel momento in cui non è presente un economizzatore convenzionale, con il fine di evitare il surriscaldamento, gli scambiatori aria-aria sono, talvolta, controllati per mantenere una temperatura fissa al nodo d'uscita del componente.

Pertanto, nel momento in cui si prevede il controllo della temperatura di set point in uscita dal recuperatore, viene aggiunto automaticamente un “set point manager”, che ha il fine, appunto, di

controllare il valore della temperatura in corrispondenza del nodo d'uscita del recuperatore. Nei recuperatori a piastre, si usa una serranda di bypass, che esclude dal trattamento di recupero una parte, oppure tutto il flusso di aria esterna di rinnovo.

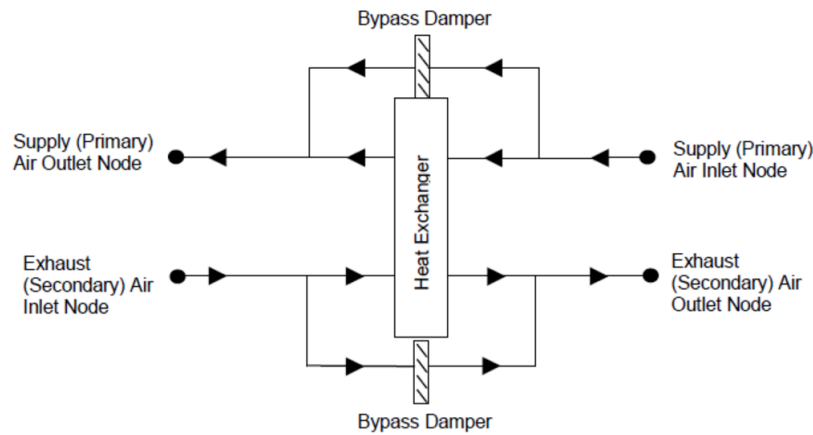


Fig. 5.4.3.2: Scambiatore aria-aria in EnergyPlus [132]

Il controllo della temperatura massima in uscita dal recuperatore si basa sul problema che molti sistemi attuali trasferiscono energia termica al flusso d'aria in ingresso senza tenere conto di un limite di temperatura.

Questa tipologia di controllo pone un limite superiore al valore della temperatura in uscita dallo scambiatore a piastre, sfruttando nei casi in cui il limite è raggiunto l'apertura della serranda di bypass. In tal caso, è possibile sfruttare l'energia termica persa per il riscaldamento di un altro fluido termovettore (ad esempio per la fornitura di acqua calda sanitaria).

Quando non è selezionato l'economizzatore convenzionale, può essere selezionata la temperatura di set point di riscaldamento per il recuperatore di calore. Tale valore viene applicato per l'intero arco annuale: ad esempio, l'immissione di una temperatura di set point pari a 15 °C, consente di prevedere che il sistema modellato riscalda l'aria esterna di rinnovo fino ad una temperatura massima pari a 15 °C. Un valore troppo alto fornirà un riscaldamento ottimale dell'aria esterna, ma determinerà carichi di raffrescamento maggiori in regime estivo.

Secondo opportune valutazioni, si è ritenuto che la temperatura di set point del nodo in uscita dallo scambiatore che consente di raggiungere un miglior compromesso tra la domanda energetica in regime invernale e quella in regime estivo è pari a 18 °C a Palermo, a 21 °C a Milano e 24 °C a Berlino.

Il recuperatore modellato consente di recuperare sia la quota di calore sensibile, che latente.

Le categorie di recuperatori aria-aria (Norma Eurovent 10/1) sono le seguenti:

1. Categoria I, scambiatori statici a scambio diretto;
 - Ia con parete di separazione;
 - Ib con parete porosa di separazione;
2. Categoria II, scambiatori statici a scambio indiretto;
 - IIa senza cambiamento di fase;
 - IIb con cambiamento di fase;
3. Categoria III, scambiatori rotanti a scambio diretto;

- IIIa non igroscopico;
- IIIb igroscopico.

Nell'attività di ricerca è stato considerato un recuperatore del tipo statico a scambio diretto con parete di separazione, quindi appartenente alla categoria Ia. I recuperatori di categoria Ia hanno la possibilità di recuperare il calore sensibile e latente. Infatti, quando le pareti dello scambiatore sono più fredde della temperatura di rugiada dell'aria estratta, il vapore in essa contenuto condensa ed è trasferito all'aria di rinnovo in ingresso.

Normalmente il movimento dell'aria avviene a flusso incrociato ed il rendimento ha valori compresi tra il 40 ed il 70 %. Valori maggiori di rendimento sono ottenibili con modelli a flusso controcorrente (rendimenti che vanno oltre l'80 % a fronte di un relativo maggior costo dell'unità).

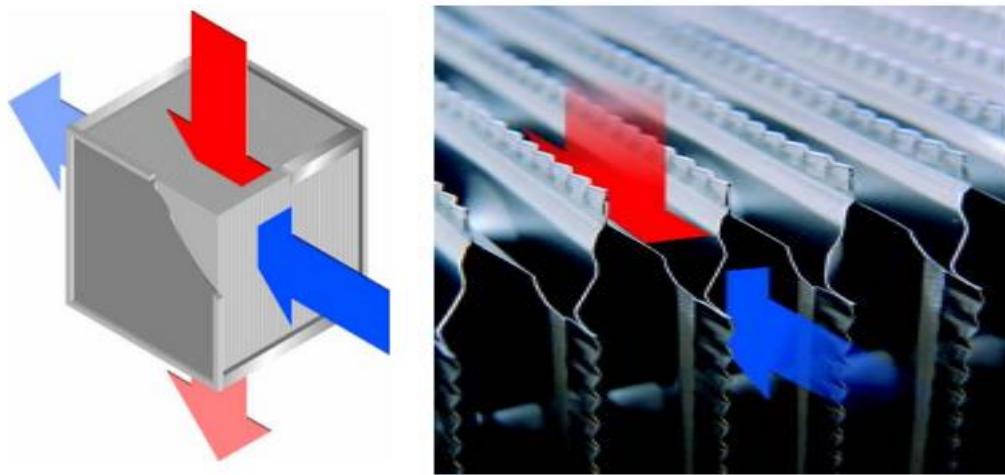


Fig. 5.4.3.3: Scambiatore aria-aria a piastre [133]

Il rendimento, durante l'attività di ricerca, utilizzato per il componente di recupero energetico è il seguente:

1. sensibile:
 - portata nominale 100 %: riscaldamento 75 %, raffrescamento 75 %;
 - portata pari al 75 %: riscaldamento 70 %, raffrescamento 70 %;
2. latente:
 - portata nominale 100 %: riscaldamento 70 %, raffrescamento 70 %;
 - portata pari al 75 %: riscaldamento 65 %, raffrescamento 65 %.

5.4.4 Scambiatori di calore terra-aria

Un sistema di raffrescamento molto antico, presente già in ville cinquecentesche (ad esempio nelle ville di Costozza, Vicenza) è quello in cui l'aria, prima di giungere negli ambienti, passa attraverso i covoli, ossia dei cunicoli naturali ed ampliati in epoca romana, dove si innesca il

moto dell'aria a causa di una differenza di densità, determinata da diversi livelli di temperatura. In tali elementi, l'aria si mantiene ad una temperatura pressoché costante, pari a circa 10°C.

Diversi studi sono stati svolti su questa tipologia di scambiatori, ad esempio quelli di Santamouris e Argiriou degli anni '90 [134], focalizzati sugli effetti di uno scambiatore terra-aria installato presso l'Università di Ioannina, località caratterizzata da un clima invernale tra i più rigidi in Grecia e quello estivo caldo-umido. In questo caso, lo scambiatore è costituito da 5 condotti installati ad una profondità di 2 m, lunghi 30 m ed aventi un diametro pari a 15 cm. La velocità dell'aria è di 3 m/s. Le misurazioni hanno messo in luce che la temperatura dell'aria, con livelli massimi di circa 35 °C, diminuiva di 10 °C all'uscita dei condotti [135].

Anche altre esperienze tedesche [135] dimostrano che questa tipologia di scambiatori è più efficiente in regime estivo rispetto a quello invernale. Considerando un edificio amministrativo ad Esslingen, Germania, il 9 % del fabbisogno energetico per il riscaldamento è coperto dallo scambiatore terra-aria; mentre, in estate, la percentuale di riduzione del fabbisogno energetico è maggiore, pari a circa il 23 %.

Nel seguente lavoro, sono state condotte analisi parametriche, valutando l'incidenza di diverse tipologie di terreno, della profondità di installazione, delle dimensioni dei condotti (lunghezza e raggio) e di vari tipi di controllo automatico.

Questo studio è stato svolto, come visto in precedenza, su tre edifici di riferimento localizzati a Palermo, Milano e Berlino.

Sono stati valutati i consumi di energia elettrica connessi alla climatizzazione invernale ed estiva, con e senza l'ausilio dello scambiatore terra-aria e sono state svolte alcune valutazioni economiche.

Con il fine di svolgere un'analisi preliminare è stato impiegato il software GAEA (Fig. 5.4.4.1) [71], basato sul calcolo analitico dello scambio energetico tra il terreno e l'aria nei condotti. Dai dati di output, risulta che la soluzione più opportuna è quella caratterizzata dall'installazione di molteplici condotti.

Ad esempio, il confronto tra circa 500 soluzioni, definite facendo variare i parametri riportati in Tab. 5.4.4.1 mette in luce che la soluzione che permette di conseguire un maggiore guadagno energetico (Fig. 5.4.4.1) è quella che presenta:

- 2 condotti;
- condotti lunghi 150 m;
- diametro pari a 200 mm;
- distanza tra condotti uguale a 2 m;
- profondità 3 m.

Invece, dal punto di vista economico, è preferibile la seguente configurazione:

- 1 condotto;
- condotti lunghi 100 m;
- diametro pari a 400 mm;
- distanza tra condotti uguale a 1 m;
- profondità 1 m.

Ottimizzazione – Parametri in gioco		
Parametro	Valore minimo	Valore massimo
Numero condotti	1	2*
Lunghezza condotto	10 m	150 m
Diametro condotto	200 mm	1000 mm
Distanza tra condotti	0.5 m	2 m
Profondità	1 m	10 m
Configurazione ventilatore	Prima dello scambiatore	Dopo dello scambiatore

*la scelta di porre massimo 2 condotti è connessa al fatto che con EnergyPlus è possibile modellare uno scambiatore aria-aria costituito da un solo condotto

Tab. 5.4.4.1: Parametri per la fase di ottimizzazione

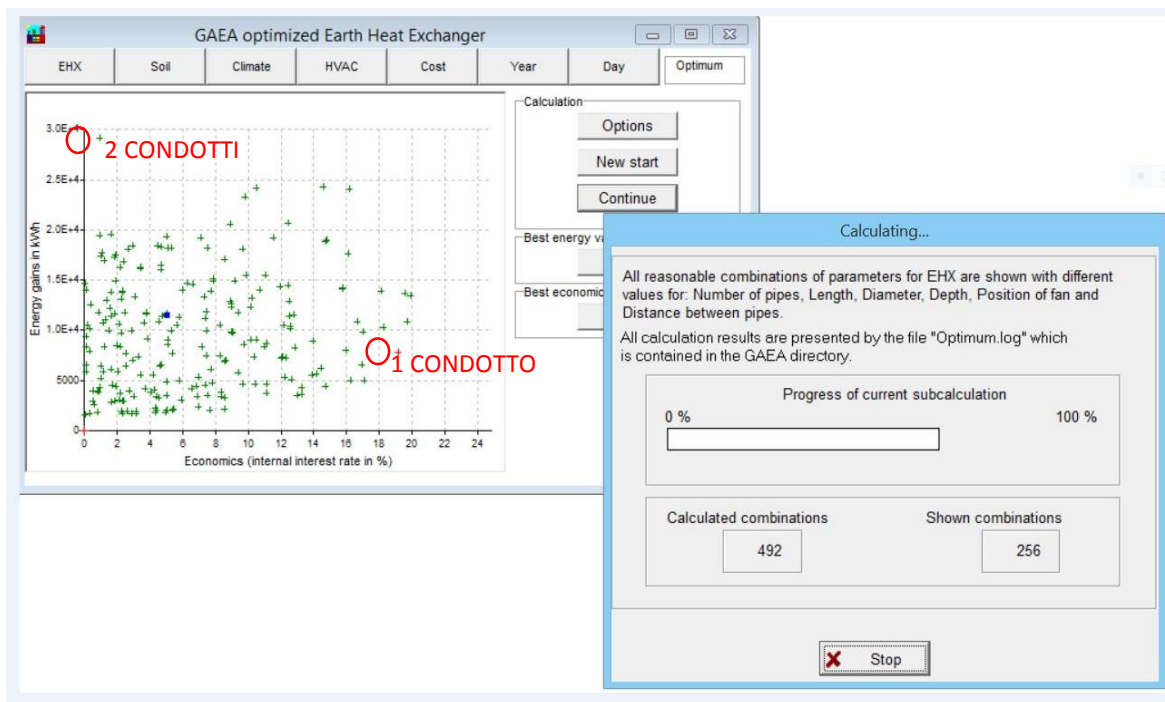


Fig. 5.4.4.1: Ottimizzazione degli scambiatori terra-aria - schermate di output del software GAEA

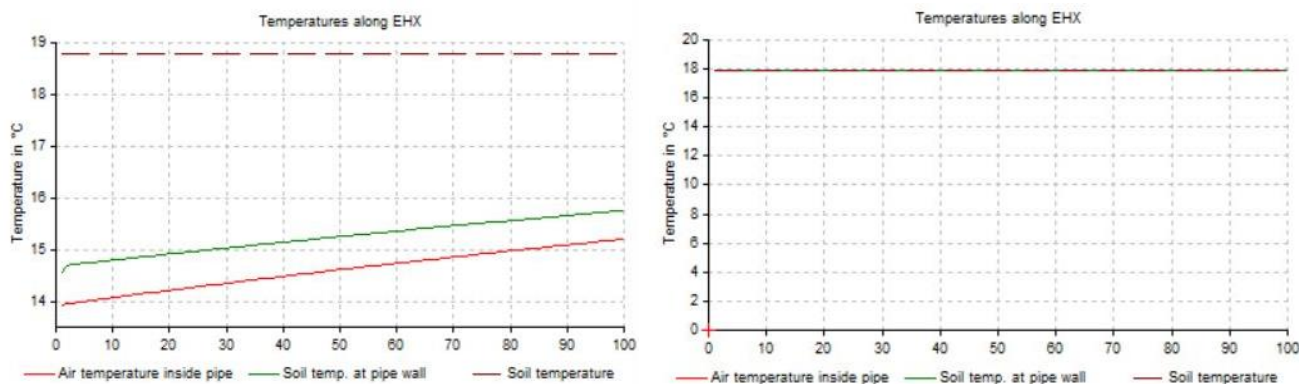


Fig. 5.4.4.2: Condizioni termiche in un giorno tipico invernale (a sinistra) ed in un giorno tipico estivo (a destra), Palermo

Le temperature in gioco, in un giorno tipico invernale (1 gennaio, ore 12:00) ed in un giorno tipico estivo (1 agosto, ore 12:00), sono mostrate in Fig. 5.4.4.2. E' possibile notare che le temperature nel giorno tipico estivo sono più alte (pari a circa 18 °C).

Tutte le altre analisi sono state svolte impiegando Energyplus 8.1.

In EnergyPlus è possibile simulare il comportamento energetico di uno scambiatore terra-aria. La modellazione di questo componente prevede la determinazione di diversi parametri, quali:

1. differenza di temperatura tra l'ambiente interno ed esterno al di sotto delle quali lo scambiatore viene disattivato;
2. tipologia dello scambiatore:
 - a circolazione naturale;
 - a circolazione forzata con flusso d'aria esausto;
 - a circolazione forzata con flusso d'aria esterno al quale viene aggiunto un appropriato apporto di energia termica dovuto al ventilatore;
3. pressione ed efficienza del ventilatore;
4. raggio, spessore e lunghezza del condotto;
5. materiale del condotto, metallico o plastico;
6. profondità;
7. tipologia di terreno;
8. temperatura media del terreno;
9. variazione massima (ampiezza) della temperatura del terreno rispetto al valore medio;
10. costante di fase della temperatura;
11. coefficiente di flusso costante;
12. coefficiente di flusso delle temperature, variabile in funzione della temperatura di bulbo secco esterna ed interna;
13. coefficiente di flusso della velocità, che dipende dalla velocità del vento;
14. coefficiente di flusso della velocità al quadrato, che dipende dalla velocità al quadrato del vento.

Uno scambiatore terra-aria cede o sottrae, in funzione della stagione, l'energia termica dal terreno al flusso d'aria da immettere nell'edificio. Lo scambiatore può essere controllato mediante un programma che specifica le temperature interne massime (per il riscaldamento) e minime (per il raffrescamento) al di sopra/sotto delle quali lo scambio termico viene disattivato.

Come avviene per il calcolo delle infiltrazioni, la portata effettiva d'aria attraverso il condotto dipende dalla differenza di temperatura tra l'ambiente interno, esterno e la velocità del vento. L'Eq. 5.20 riporta il calcolo di base per valutare la portata d'aria.

$$EarthTubeFlowRate = E_{design} F_{schedule} \left[A + B |T_{zone} - T_{odb}| + C WindSpeed + D WindSpeed^2 \right] \quad (5.20)$$

dove:

E_{design} è la portata d'aria di progetto (m³/s);

$F_{schedule}$ è il programma correlato al funzionamento dello scambiatore;

A è il coefficiente di flusso termico costante;

B è il coefficiente di flusso della temperatura;

C è il coefficiente di flusso della velocità;

D è il coefficiente di flusso della velocità al quadrato.

Per valutare l'effetto dello scambiatore terra-aria, occorre che la temperatura del terreno sia attendibile. Non avendo a disposizione misure di temperatura del terreno in loco, per determinare la temperatura del suolo è possibile impiegare dati empirici oppure modelli noti in letteratura.

I dati empirici mostrano l'andamento della temperatura in funzione della profondità e del periodo di riferimento.

Dal punto di vista termico, il terreno può essere suddiviso in due strati principali (Fig. 5.4.4.3) [136]:

1. termicamente instabile, che viene sfruttato generalmente con sistemi di scambio termico orizzontali;
2. termicamente stabile, che viene sfruttato con sistemi di scambio termico verticali.

Il primo strato, quello instabile, si contraddistingue per la presenza di temperatura variabili dovute alle fluttuazioni climatiche atmosferiche; invece, il secondo strato, quello stabile, presenta temperature che non sono influenzate dalle condizioni climatiche esterne, ma dipende principalmente dal flusso geotermico e dalla presenza di falde sotterranee.

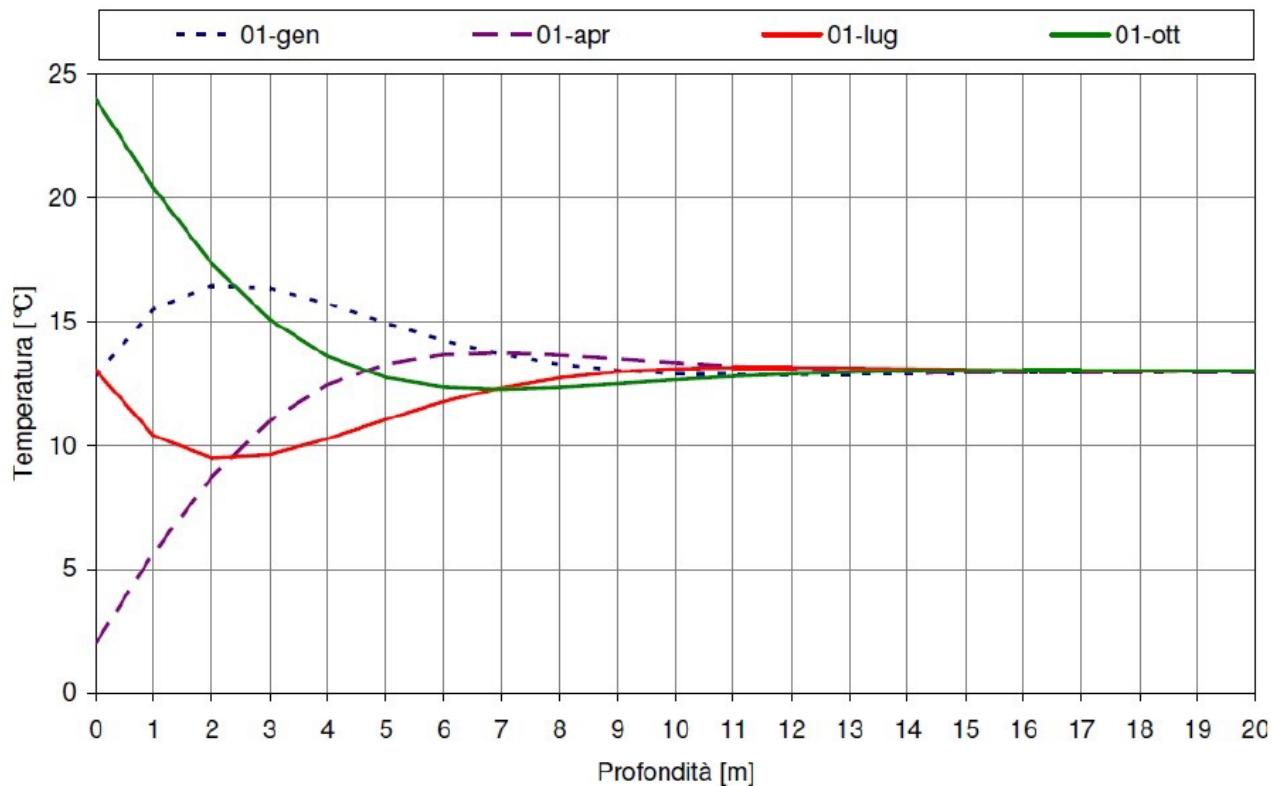


Fig. 5.4.4.3: Strato termicamente instabile e stabile del terreno

Le condizioni termiche del suolo (in entrambi gli strati) sono influenzate dalla presenza dell'acqua di falda, che influisce sulla capacità di scambio termico e sulla capacità di accumulo dell'energia.

La temperatura dello strato termicamente stabile può essere valutata come la media annuale delle temperature dell'aria esterna (eccetto alcune zone di anomalia termica) ed aumenta in relazione alla profondità in ragione di un gradiente termico pari a 0.03 °C/m [136].

Le proprietà termofisiche del terreno vengono definite mediante un'indagine geologica nell'area di installazione dello scambiatore di calore, ma in via preliminare è possibile far riferimento ad alcune relazioni geologiche sulla composizione del terreno ed ai vari dati climatici della località. Successivamente, i calcoli potranno essere confermati in fase di realizzazione e validate con un test di risposta termica (TRT).

Le caratteristiche del terreno da considerare ai fini energetici sono:

- conducibilità termica;
- densità;
- calore specifico;
- capacità termica (ottenuta come prodotto tra densità e calore specifico).

In funzione della tipologia di terreno e del materiale di riempimento è possibile considerare le proprietà riportate in Tab. 5.4.4.2 – 5.4.4.3.

Con lo scopo di valutare le caratteristiche termiche medie del terreno, nel caso di differenti formazioni geologiche, si può calcolare la media pesata delle singole caratteristiche secondo l'Eq. 5.21.

$$\text{Dato}_g = \frac{[(\text{Dato}_{s1} \cdot z_{s1}) + (\text{Dato}_{s2} \cdot z_{s2}) + \dots + (\text{Dato}_{sn} \cdot z_{sn})]}{z_g} \quad (5.21)$$

dove:

Dato_g valore medio pesato del dato ricercato per il terreno;

Dato_{sn} valore del dato relativo a ciascuna formazione geologica;

z_n spessore della singola formazione geologica espresso in [m];

z_g profondità complessiva raggiunta dallo scambiatore a terreno espressa in [m].

Roccia	Densità	Conduttività termica		Capacità termica volumetrica
	[kg/dm ³]	[W/(m K)]		[MJ/(m ³ K)]
			valor medio	
Rocce magmatiche				
Basalto	2,6-3,2	1,3-2,3	1,7	2,3-2,6
Diorite	2,9-3,0	2,0-2,9	2,5	2,9
Gabbro	2,8-3,1	1,7-2,9	2,0	2,6
Granito	2,4-3,0	2,1-4,1	3,2	2,1-3,0
Riolite	2,6	3,1-3,4	3,3	2,1
Rocce metamorfiche				
Gneiss	2,4-2,7	1,9-4,0	2,9	1,8-2,4
Marmo	2,5-2,8	2,1-3,1	2,5	2,0
Quarzite	2,5-2,7	5,0-6,0	5,5	2,1
Micascisti	2,4-2,7	1,5-3,1	2,2	2,2-2,4
Anfibolite	2,6-2,9	2,1-3,6	2,9	2,0-2,3
Rocce sedimentarie				
Arenaria	2,2-2,7	1,9-4,6	2,8	1,8-2,6
Calcare	2,4-2,7	2,0-3,9	2,7	2,1-2,4
Marna	2,3-2,6	1,8-2,9	2,3	2,2-2,3
Rocce argillose/limose	2,4-2,6	1,1-3,4	2,2	2,1-2,4
Materiale non consolidato				
Argilla/limo – secco	1,8-2,0	0,4-1,0	0,5	1,5-1,6
Argilla/limo – umida	2,0-2,2	1,1-3,1	1,8	2,0-2,8
Ghiaia secca	1,8-2,2	0,4-0,9	0,4	1,3-1,6
Ghiaia umida	1,9-2,3	1,6-2,5	1,8	2,2-2,6
Depositi morenici	1,8-2,3	1,1-2,9	2,4	1,5-2,5
Sabbia secca	1,8-2,2	0,3-0,9	0,4	1,3-1,6
Sabbia umida	1,9-2,3	2,0-3,0	2,4	2,2-2,8
Torba	0,5-1,1	0,2-0,7	0,4	0,5-3,8

Tab. 5.4.4.2: Caratteristiche termiche di diverse tipologie di terreno

Materiale di riempimento	Conduttività termica
	[W/(m K)]
Bentonite (20%)	0,73
Bentonite (30%)	0,74
Malta di cemento	0,70
Calcestruzzo leggero	1,04
Calcestruzzo (50% sabbia quarzifera)	1,90
Bentonite (20%) Quarzite (40%)	1,47
Bentonite (30%) Quarzite (30%)	1,21

Tab. 5.4.4.3: Caratteristiche termiche di vari materiali di riempimento

Nello strato termicamente instabile, la temperatura varia in funzione della profondità e del clima. Vengono definite alcune ipotesi:

1. la presenza d'acqua di percolazione meteorica è trascurabile;
2. i regimi di sfruttamento del banco geotermico sono trascurabili;
3. la temperatura superficiale del terreno è pari a quella dell'aria ed ha un'evoluzione temporale di tipo sinusoidale come quello dell'aria;
4. l'effetto dell'irraggiamento solare è trascurabile.

Allora, la temperatura del terreno può essere approssimata, considerando l'equazione analitica di diffusione del calore in un piano semi-infinito dovuto ad una sollecitazione termica di tipo sinusoidale (Eq. 5.22):

$$\theta_g(d, t) = \theta_M - A_{\theta, s} \cdot \exp \left[-d \cdot \left(\frac{\pi}{365\alpha} \right)^{1/2} \right] \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} \cdot \left(t - T_0 - \frac{d}{2} \cdot \left(\frac{365}{\pi \cdot \alpha} \right)^{1/2} \right) \right] \quad (5.22)$$

Dove:

$\theta_g(d, t)$ è la temperatura del terreno alla profondità d dopo t giorni dal primo giorno di gennaio, [°C]

θ_M è temperatura media del terreno nello strato termicamente stabile, [°C]

$A_{\theta, s}$ è l'ampiezza di oscillazione annuale della temperatura, [°C]

T_0 è numero del giorno corrispondente alla temperatura minima del terreno (a partire dal primo gennaio)

d è profondità [m]

t è numero di giorni (1 gennaio = 1)

α è diffusività termica del terreno (m²/giorno)

La temperatura media del terreno nello strato termicamente stabile (θ_M) può essere valutata come il valore medio della temperatura dell'aria del sito considerato, a sua volta ricavabile mediante l'Eq. 5.23. L'Eq. 5.23 non è sufficiente, senza conoscere i dati meteorologici dell'anno-tipo (ad esempio quelli IWEC dell'ASHRAE o Meteonorm), per trovare la temperatura media del terreno. In caso contrario, occorre svolgere una regressione su dati sperimentali di 754 stazioni meteo italiane, come descritto in [136].

$$Ta_y = 33.73 - 0.0063 \cdot Z - 0.4091 \cdot Lat \quad (5.23)$$

Dove:

Ta_y è la temperatura media annua dell'aria [°C];

Z è la quota del punto [m];

Lat è la latitudine in gradi sessadecimali [°].

Anche l'ampiezza di oscillazione annuale della temperatura può essere valutata con i dati meteo del sito. Occorre determinare la temperatura del terreno di progetto durante il mese più

freddo e più caldo. In questo caso, nota la diffusività termica, si può individuare con le Eq. 5.24 - 5.25 (ad una profondità media di installazione):

1. la temperatura adimensionale del terreno nella stagione di riscaldamento, nel giorno nel quale si ha la temperatura minima dell'aria esterna. In assenza di informazioni si assume come T0 il giorno 15 gennaio:

$$\theta_g(d, T_0) = -Exp \left[-d \cdot \left(\frac{\pi}{365\alpha} \right)^{1/2} \right] \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} \cdot \left(-\frac{d}{2} \cdot \left(\frac{365}{\pi\alpha} \right)^{1/2} \right) \right] \quad (5.24)$$

2. la temperatura adimensionale del terreno nella stagione estiva nel giorno T0+180 quando si verifica il massimo della temperatura esterna (tra luglio-agosto)

$$\theta_g(d, T_0 + 180) = -Exp \left[-d \cdot \left(\frac{\pi}{365\alpha} \right)^{1/2} \right] \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} \cdot \left(180 - \frac{d}{2} \cdot \left(\frac{365}{\pi\alpha} \right)^{1/2} \right) \right] \quad (5.25)$$

Successivamente, si procede a calcolare le temperature medie mensili $\theta_{S,L}$ e $\theta_{S,H}$ (minima e massima) (Eq. 5.26 - 5.27) nelle condizioni di picco a partire dai valori sopra descritti:

$$\theta_{S,L} = \theta_g(d, T_0) \cdot A_{\theta,S} + \theta_M \quad [^{\circ}C] \quad (5.26)$$

$$\theta_{S,H} = \theta_g(d, T_0 + 180) \cdot A_{\theta,S} + \theta_M \quad [^{\circ}C] \quad (5.27)$$

In bibliografia esistono anche altre metodologie di approccio per simulare la temperatura del terreno: una prima si basa su una simulazione agli elementi finiti e viene applicata dal software di calcolo Heat2 oppure Heat3; un'altra è stata sviluppata da Incropera e DeWitt [137] ed è un approccio di tipo numerico basato sull'analogia elettrica. Quest'ultimo approccio è impiegato per conseguire una migliore valutazione dell'evoluzione spazio-temporale del campo termico del terreno, nel quale si tiene conto anche dell'irraggiamento. In questo caso, la superficie del terreno scambia calore sia per convezione che per radiazione; all'interno del terreno si assume che il calore sia trasmesso soltanto per conduzione termica e nella sola direzione della profondità. Il terreno è suddiviso in vari strati e ciascuno si contraddistingue da una resistenza ed una capacità termica. La capacità termica è concentrata nel baricentro dello strato. Le proprietà termofisiche del terreno (conduttività termica, calore specifico e densità) sono assunte uniformi e costanti nel tempo.

I dati relativi alla temperatura del suolo sono stati individuati mediante il software CalcSoilSurfTemp e, dunque, inseriti manualmente nei campi appositi in EnergyPlus. Mediante tale programma sono stati desunti tre parametri importanti per la simulazione dello scambiatore terra-aria:

1. la temperatura media annuale della superficie del terreno;
2. l'ampiezza della variazione temporale della temperatura superficiale del suolo;

3. la costante di fase della temperatura superficiale del suolo.

Utilizzando il software CalcSoilSurfTemp, questi parametri sono valutati (Tab. 5.4.4.4) considerando:

1. il trasferimento di calore per convezione tra l'aria e la terra;
2. l'assorbimento della radiazione solare da parte del terreno;
3. la radiazione ad onda lunga emessa dal suolo;
4. la perdita di calore latente a causa dell'evaporazione dell'umidità.

Questo software richiede due dati in ingresso:

1. condizioni del suolo, che determinano la diffusività e la conducibilità del terreno circostante (pesante e saturo, pesante e umido, pesante e secco, leggero e asciutto);
2. condizione superficiale del suolo, per le quali occorre determinare le condizioni del suolo sopra il condotto, ovvero:
 - nudo e bagnato;
 - nudo e umido;
 - nudo e asciutto;
 - nudo e secco;
 - coperto e bagnato;
 - coperto e umido;
 - coperto e asciutto;
 - coperto e secco.

Quest'ultimo dato, invece, permette di valutare il coefficiente di assorbimento e la velocità di evaporazione del terreno.

	Palermo	Milano	Berlino
Temperatura media (°C)	17.8	14.37	10.69
Ampiezza della temperatura (°C)	5.73	9.86	13.46
Giorno con T minima	30	71	65

Tab. 5.4.4.4: Dati di output del software CalcSoilSurfTemp relativi alle condizioni del terreno

5.4.5 Risultati conseguiti e confronto tra le due tipologie di scambiatori

Lo scambiatore terra-aria è posto a monte dell'unità di trattamento dell'aria primaria (UTA), in modo tale da avere il preriscaldamento dell'aria (in regime invernale) ed il preraffrescamento dell'aria (nella stagione estiva). L'installazione dello scambiatore di calore terra-aria (EAHX) consente di ridurre la domanda di energia (per riscaldamento e raffrescamento) e le emissioni di CO₂ equivalenti.

Lo scambiatore, come visto precedentemente, sfrutta la capacità del terreno di accumulare energia termica, attraverso un sistema di condotti installati nel sottosuolo orizzontalmente.

In estate il terreno presenta una temperatura inferiore a quella dell'aria esterna, mentre in inverno potrebbe avere una temperatura superiore a quella dell'aria esterna.

I risultati sono riportati per ogni città e mostrano l'efficacia dello scambiatore aria-aria e di quello terra-aria sia in regime estivo, che in quello invernale, nonché su base annuale. Inoltre, in

ciascuna delle Figs. 5.4.5.1-5.4.5.3 gli ultimi istogrammi fanno riferimento ad una soluzione impiantistica integrata composta da entrambe le tipologie di scambiatore, considerando che lo scambiatore aria-aria riesce a minimizzare la richiesta energetica soprattutto in inverno, mentre in estate funziona in modo migliore lo scambiatore terra-aria.

La Fig. 5.4.5.1 presenta il fabbisogno di energia elettrica dell'edificio ad uso uffici, per la climatizzazione estiva ed invernale per la città di Palermo si nota che la presenza dello scambiatore aria-aria induce migliori prestazioni in regime invernale (riduzione del fabbisogno energetico di riscaldamento del 97 % per Palermo), mentre la presenza dello scambiatore terra-aria consente di ridurre maggiormente il fabbisogno energetico estivo (riduzione del fabbisogno energetico di raffrescamento del 46 %). Prevedendo l'utilizzo di entrambi gli scambiatori di calore e facendoli funzionare uno in inverno (scambiatore aria-aria) e l'altro in estate (scambiatore terra-aria), è possibile conseguire un risparmio energetico globale pari al 59 %. Analogamente, si leggono le Figs. relative alla città di Milano (Fig. 5.4.5.2) ed alla città di Berlino (Fig. 5.4.5.3). E' possibile evidenziare che più il clima risulta rigido, maggiormente la soluzione combinata scambiatore di calore aria-aria e terra-aria risulta migliore, ovvero la percentuale di riduzione globale passa da 59 % (Palermo), a 74 % (Milano), a 79 % (Berlino).

Infine, in Fig. 5.4.5.4, è riportata la richiesta energetica dell'edificio al variare della lunghezza dello scambiatore terra-aria, della profondità e del diametro per la città di Palermo. Si può notare che oltre la profondità di 4 m, la riduzione del fabbisogno energetico diventa trascurabile. In tal caso la soluzione ottimale (dal punto di vista energetico ed economico) risulta essere quella con lo scambiatore interrato ad una profondità di 4 m e lungo 100 m.

La Fig. 5.4.5.5, invece, mette in luce la variazione del fabbisogno energetico annuale in funzione della portata di aria e del controllo di accensione e spegnimento dello scambiatore terra-aria per la città di Milano. In questo caso, l'accensione 8:00-10:00 e 15:00-18:00 consente di ridurre la richiesta energetica di circa il 3 % rispetto al funzionamento 8:00-18:00. Inoltre, la portata d'aria raddoppiata, rispetto alle esigenze minime di rinnovo, non risulta conveniente, anche se l'accensione in intervalli di tempo ridotti (8-11 e 14-18) riduce la penalizzazione energetica.

In ultimo la Fig. 5.4.5.6 evidenzia l'andamento del fabbisogno energetico al variare della tipologia di terreno, per la città di Palermo:

1. tipo 1: pesante, secco;
2. tipo 2: leggero, umido;
3. tipo 3: leggero, secco;
4. tipo 4: pesante, umido.

La tipologia n. 4 risulta essere la migliore, nel caso di Palermo. È possibile ottenere una riduzione della richiesta di raffrescamento del 19.3 % ed un aumento, invece, di quella di riscaldamento del 6 % rispetto alla tipologia n. 1.

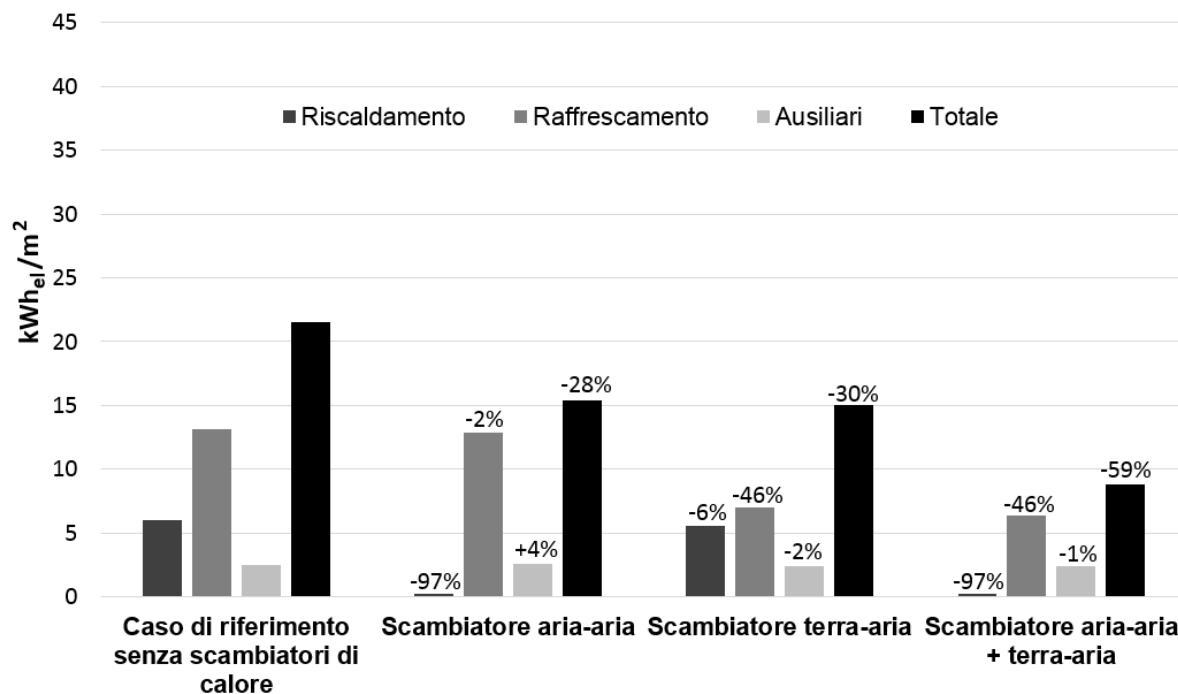


Fig. 5.4.5.1: Consumi di energia elettrica per la climatizzazione estiva ed invernale, per la città di Palermo, con e senza l'uso di scambiatori di calore. Nota: la percentuale di riduzione è valutata rispetto al caso di riferimento

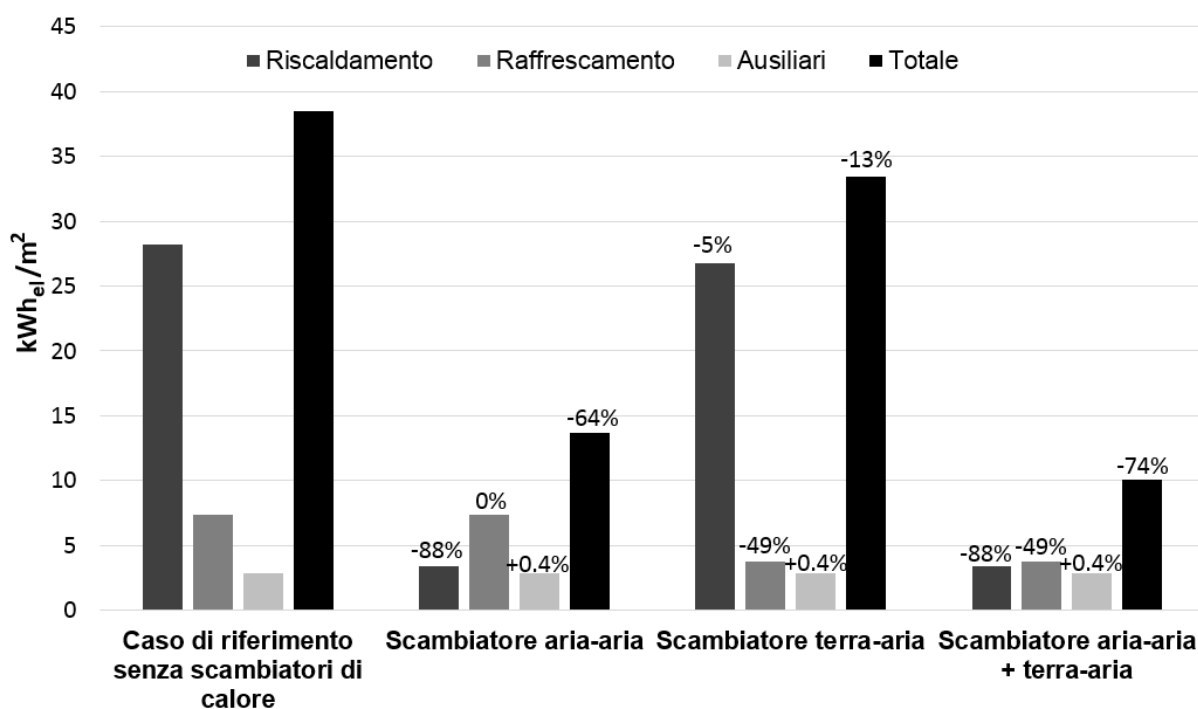
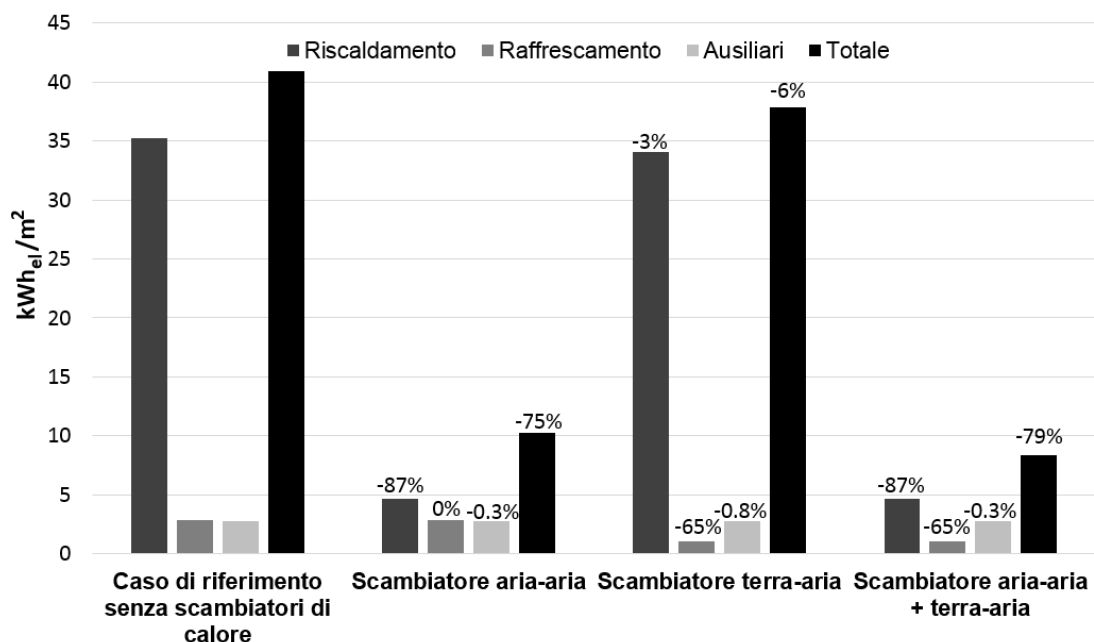


Fig. 5.4.5.2: Consumi di energia elettrica per la climatizzazione estiva ed invernale, per la città di Milano, con e senza l'uso di scambiatori di calore. Nota: la percentuale di riduzione è valutata rispetto al caso di riferimento

Fig.



5.4.5.3: Consumi di energia elettrica per la climatizzazione estiva ed invernale, per la città di Berlino, con e senza l'uso di scambiatori di calore. Nota: la percentuale di riduzione è valutata rispetto al caso di riferimento

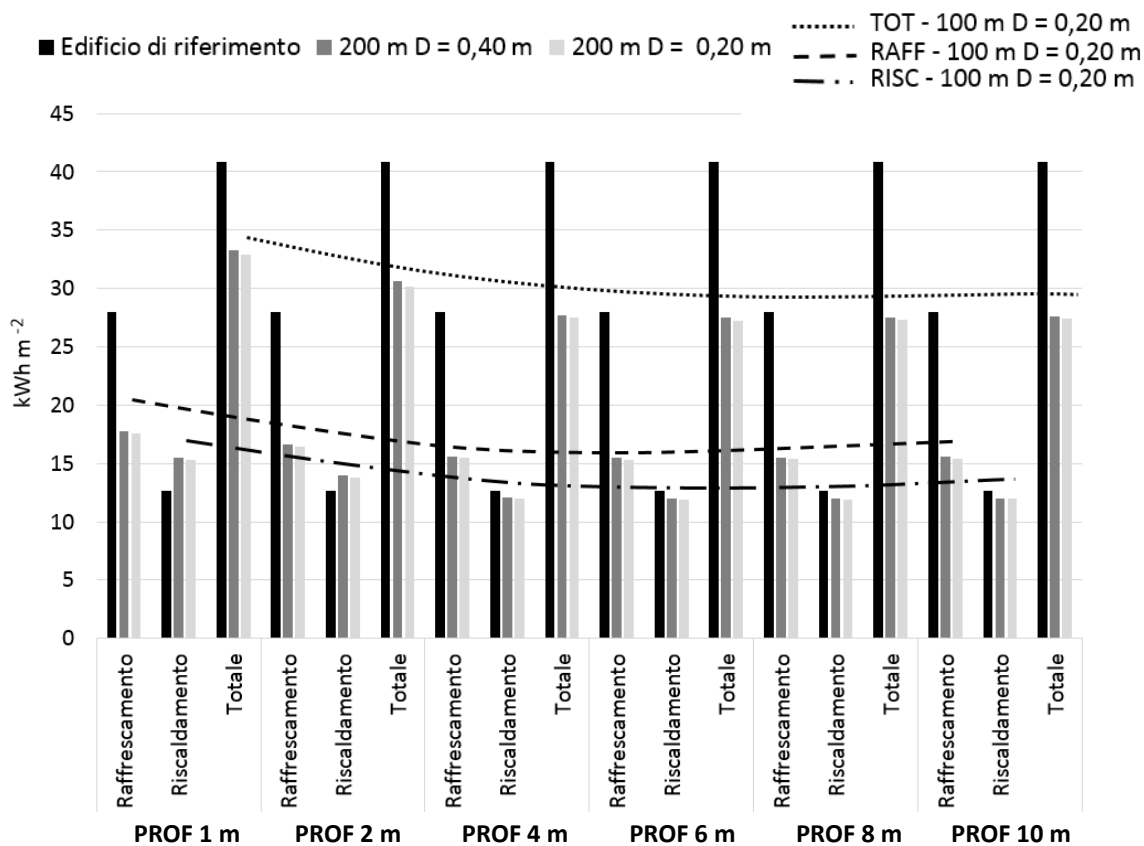


Fig. 5.4.5.4: Consumi di energia primaria per la città di Palermo al variare della lunghezza, del diametro e della profondità di installazione dello scambiatore terra-aria

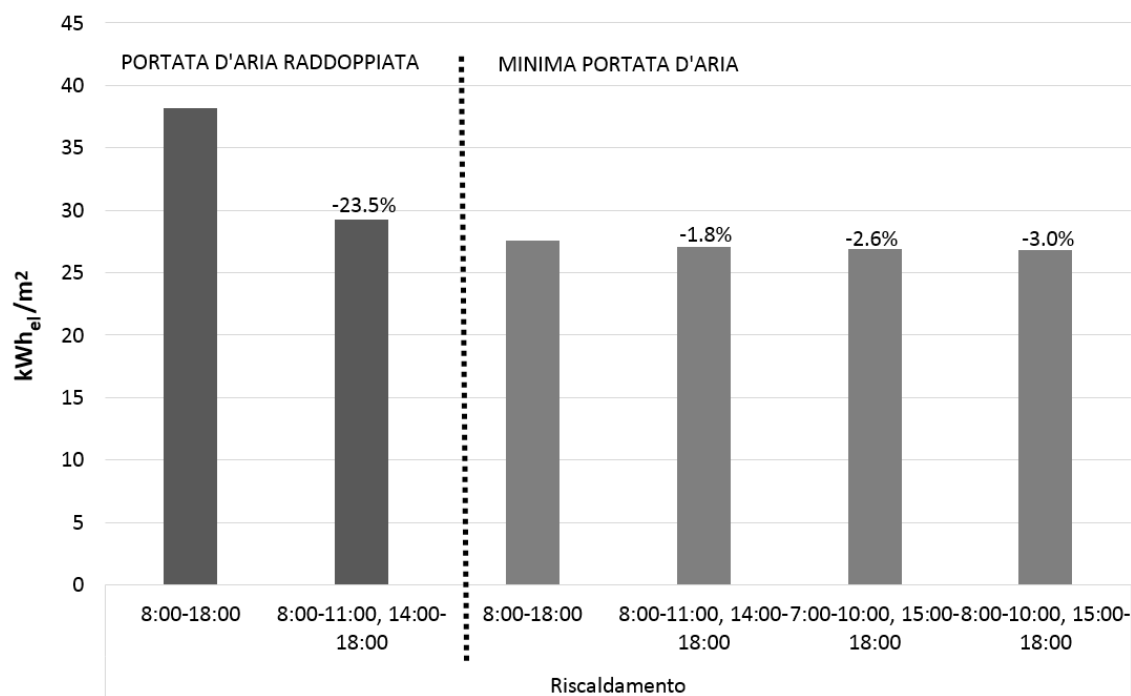


Fig. 5.4.5.5: Risultati per la città di Milano. Fabbisogno energetico al variare della portata di aria e del controllo di accensione e spegnimento dello scambiatore terra-aria

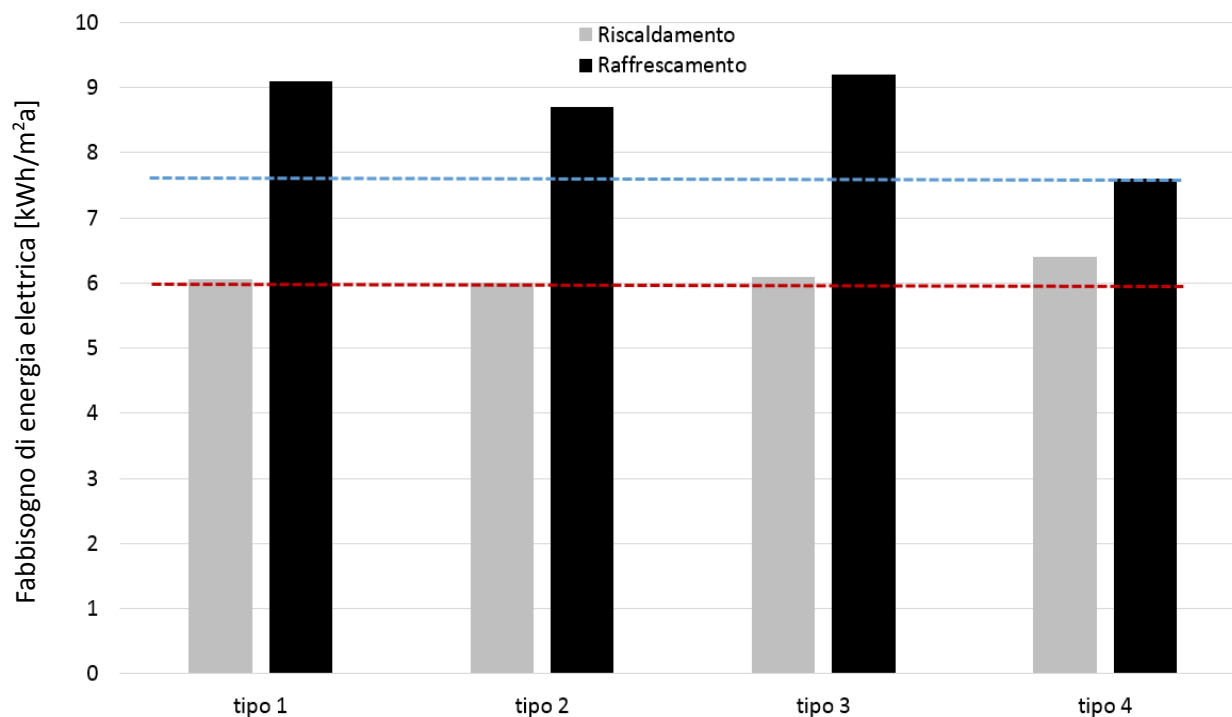


Fig. 5.4.5.6: Risultati per la città di Palermo. Fabbisogno energetico al variare della tipologia di terreno. Tipo 1: pesante, secco; tipo 2: leggero, umido; tipo 3: leggero, secco; tipo 4: pesante, umido.

5.5 Ottimizzazione del sistema edificio-impianto: i nZEB

5.5.1 Introduzione

Una strategia per ridurre l'impatto ambientale, come visto nei capitoli precedenti, è quella che prevede la minimizzazione del fabbisogno energetico degli edifici. Per questo motivo, la Direttiva Europea 31/2010/EU [16] ha introdotto un nuovo concetto di edificio, ossia il nearly Zero Energy Building (nZEB), vale a dire *“un edificio ad altissima prestazione energetica, il cui fabbisogno energetico dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili”*.

Dal concetto di nZEB, deriva quello di Net Zero Energy Buildings (NZEB) in cui la richiesta di energia primaria non rinnovabile è pari a 0 kWh/m² su base annua.

Lo studio dei NZEB è fondamentale perché, come descritto in precedenza, la domanda energetica degli edifici è destinata ad aumentare in tutti i settori. Ad esempio, in UE gli edifici commerciali e residenziali richiedono circa il 40 % dell'energia primaria globale della comunità europea e producono il 36 % delle emissioni di CO₂.

Inoltre, per questa tipologia di edifici viene anche richiesto di raggiungere un miglior compromesso tra le soluzioni di ottimizzazione dell'efficienza energetica e la fattibilità economica.

In [138], gli autori sottolineano che il bilancio energetico, usualmente normalizzato in funzione della superficie di pavimento, nei NZEB viene effettuato, considerando l'energia importata e quella esportata attraverso il confine edilizio.

Il bilancio energetico riguarda la richiesta di energia primaria netta, denominata “net weighted energy” (vale a dire, la differenza tra energia importata ponderata e quella esportata ponderata), che deve essere uguale a zero.

I flussi in gioco, nel bilancio energetico, sono considerati in termini di energia primaria [139], utilizzando dei fattori di conversione. Ad esempio, in Italia, per passare dalla domanda di energia elettrica alla richiesta di energia primaria deve essere impiegato un coefficiente pari a 2.174 kWh_{pr}/kWh_{el}, per tener conto dell'efficienza energetica del sistema elettrico nazionale. Il fabbisogno energetico è soprattutto correlato alla domanda energetica per:

- riscaldamento;
- acqua calda sanitaria;
- raffrescamento;
- illuminazione;
- ventilazione;
- apparecchiature.

In [140], è stato evidenziato che il bilancio energetico dei nZEBs dovrebbe essere prossimo allo zero e che bisognerebbe puntare sulla diversificazione energetica, allontanandosi dagli edifici convenzionali (in cui viene impiegata soltanto una fonte per soddisfare i diversi carichi).

Nel Nord Europa e negli USA, diversi edifici sono stati progettati in modo da avere un bilancio energetico pari a zero, mentre nei paesi mediterranei la situazione, al momento attuale, non è del tutto soddisfacente [141] [142].

Nei climi contraddistinti da inverni rigidi, gli edifici ad alta efficienza energetica si contraddistinguono per la presenza di pareti multistrato ed in tali casi l'alto isolamento termico svolge un ruolo chiave [143]. Al contrario, nei climi mediterranei, in estate il calore accumulato in un edificio molto isolato dal punto di vista termico viene dissipato con maggiore difficoltà; pertanto, come visto anche nelle attività di ricerca precedenti, l'isolamento termico, nelle località con estati calde, non produce benefici [143]. Per questi motivi, diviene fondamentale la dissipazione, durante la notte, del calore accumulato durante le ore diurne [144].

Alcune fonti bibliografiche studiano l'influenza di diverse tipologie di vetro e di finestre sull'efficienza energetica degli edifici [145] [146] ed altre fonti [147] analizzano un edificio plurifamiliare NZEB con il fine di individuare alcune soluzioni opportune conseguibili con costi ragionevoli.

In un altro studio [148], è indagato un NZEB a Cardiff. Per conseguire l'ottimizzazione del progetto globale sono analizzate diverse tematiche: tecniche passive, facciate avanzate, sistemi meccanici ad alta efficienza energetica e tecnologie a fonte energetica rinnovabile.

In [149], sono stati analizzati diversi temi, quali: proprietà delle finestre, isolamento termico e WWR (window-to-wall ratio). Tutte le simulazioni energetiche mostrano che per i nZEBs la domanda complessiva di energia primaria è inferiore a 100 kWh/m²a.

I costi ottimali di un ufficio NZEB sono studiati in [150]. In questo riferimento, è stato analizzato l'impatto delle varie soluzioni progettuali sul costo ottimale e sull'efficienza energetica dell'edificio. Il costo ottimale si raggiunge nel caso di edifici a basso consumo energetico (energia primaria ≤ 130 kWh/m²a), mentre, viene evidenziato, che per i nZEBs (energia primaria ≤ 100 kWh/m²a) non è possibile conseguirlo.

Diversamente, un edificio a energia quasi zero, secondo l'EPBD recast, è quello che presenta un livello di efficienza energetica che assicura il miglior compromesso in termini di prestazioni energetiche e di costo [128]. Pertanto, vi è una connessione stretta tra gli edifici nZEBs e quegli edifici caratterizzati da livelli ottimali in funzione dei costi.

Come detto, la domanda di raffrescamento è destinata ad aumentare in tutti i settori, soprattutto nei climi mediterranei. Per tale motivo, l'indagine sui nZEBs risulta essere di fondamentale importanza. A questo scopo, il presente lavoro valuta la fattibilità di un NZEB dal punto di vista energetico ed ambientale in clima mediterraneo. I principali elementi innovativi affrontati in questo studio sono:

1. l'indagine sui benefici connessi all'uso di uno scambiatore di calore terra-aria in un NZEB, in termini di risparmio energetico e riduzione delle emissioni di CO₂ equivalenti;
2. l'analisi di un NZEB situato in un clima mediterraneo;
3. la possibilità di ottenere un NZEB utilizzando però solo lo spazio della copertura dell'edificio per sfruttare l'energia rinnovabile.

Pochi articoli di ricerca, come ad esempio i riferimenti [141] [142] [151], hanno indagato l'applicazione dei NZEBs in climi mediterranei.

Lo studio valuta la possibilità di ottenere un NZEB in una città del sud Italia, utilizzando energia rinnovabile solo in loco.

5.5.2 Approccio metodologico

La norma UNI EN 15603 [152] definisce la richiesta di energia primaria non rinnovabile di un edificio come la differenza tra l'energia importata e quella esportata. Entrambi i termini devono essere moltiplicati per opportuni fattori di conversione, che si dividono in due tipi: fattori di energia primaria non rinnovabile e quelli di energia primaria totale [153].

Il NZEB è caratterizzato da una domanda di energia primaria non rinnovabile pari a 0 kWh/m²a, mentre, come detto in precedenza, un nZEB presenta una richiesta energetica (non rinnovabile) superiore a 0 kWh/m²a, ma può essere a volte minore di zero (“plus energy buildings” o “net energy plus buildings” [154], “positive-energy buildings” [144]), Fig. 5.5.2.1.

I NZEBs ed i nZEBs (Fig. 5.5.2.1) sono edifici caratterizzati dalla presenza delle migliori pratiche di efficienza energetica e di tecnologie idonee allo sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili, come:

1. minimizzazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio, considerando una forma compatta, un adeguato isolamento e un'idonea massa termica [155], i materiali a cambiamento di fase [156] [157], le cool paints ed i cool roofs [158] [113] [114], i tetti e le pareti verdi [90], i dispositivi di ombreggiatura [111] [112], ecc;
2. minimizzazione della domanda di energia, utilizzando i sistemi di gestione dell'energia intelligenti;
3. minimizzazione della domanda di energia primaria, utilizzando impianti di riscaldamento/raffrescamento e di illuminazione ad alta efficienza [159] [160] [161];
4. elevato utilizzo di fonti di energia rinnovabili.

La valutazione dell'energia primaria netta richiede diverse fasi, come indicato dalla Gazzetta ufficiale dell'Unione europea [162]:

1. calcolo del fabbisogno di energia termica dell'edificio;
2. sottrazione, da (1), dell'energia termica prodotta da impianti che sfruttano fonti di energia rinnovabile (FER), come i collettori solari termici;
3. valutazione del fabbisogno energetico finale dell'edificio (per ogni uso e vettore energetico);
4. sottrazione dell'energia elettrica prodotta da FER, ad esempio dai sistemi fotovoltaici;
5. valutazione della domanda di energia primaria, utilizzando i fattori di conversione (valori corretti per ogni paese);
6. valutazione dell'energia esportata (in termini di energia primaria);
7. valutazione dell'energia primaria netta come differenza tra (5) e (6).

La Tab. 5.5.2.1 mostra le principali caratteristiche di alcuni nZEBs e NZEBs riportati nella letteratura scientifica.

L'attività di ricerca è svolta anche in questo caso mediante il codice di calcolo EnergyPlus e riguarda un edificio polifunzionale localizzato a Palermo contraddistinto da un clima mediterraneo con estati calde ed inverni miti (Tab. 5.5.2.2).

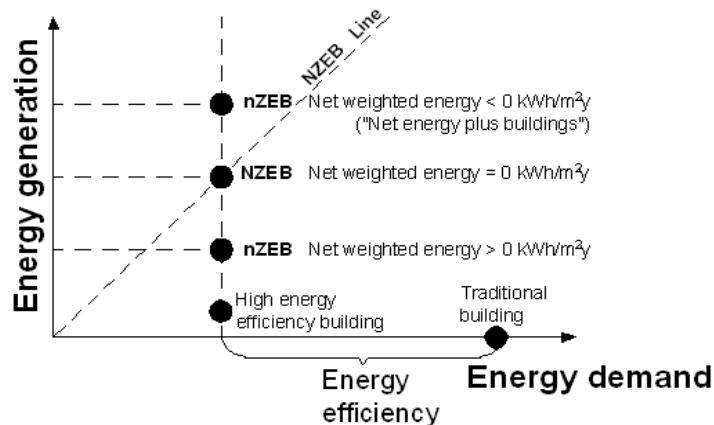


Fig. 5.5.2.1: Bilancio energetico per differenti tipologie di edificio [139]

Rif.	[35,36]	[16]	[15]	[12]	[13]	[14]	Questo lavoro
Risorsa energetica ed impianti	Pannelli PV e ST	Pannelli PV	HP geotermica + Pannelli PV	HP + Pannelli PV e ST	Riscaldamento a pavimento + HP + Pannelli PV e ST + eolico	VMC + Pannelli PV	HP + EAHX + VMC
Energia primaria, kWh/m²a	56.7 globale	≤ 100 globale	40 globale	13.7 riscaldamento	6008 [kWh] globale	66.4 globale	64 globale
Area, m²	3900	-	93	7000	-	77	1040
Tipologia edilizia	AgriScience Farm – NZEB	Uffici - nZEB	Residenziale - nZEB	Residenziale – NZEB	Residenziale - ZEB	Residenziale – NZEB	Polifunzionale
Località	Lexington (Kentucky)	Estonia	Estonia	Denmark	Cardiff	Datong (China)	Palermo

Tab. 5.5.2.1: Principali caratteristiche di alcuni nZEBs riportati nella letteratura scientifica

Parametri geografici o climatici	Unit	Value
Latitudine	[°]	38°6'43"56 N
Longitudine	[°]	13°20'11"76 E
Temperatura massima di bulbo asciutto	[°C]	34.0 (17 Lug)
Temperatura minima di bulbo asciutto	[°C]	4.8 (3 Feb)
HDD Heating Degrees Days (18.3 °C) [41]	[K*day]	802
CDD Cooling Degrees Days (18.3 °C) [41]	[K*day]	1002
Massima radiazione solare normale	[Wh/m²]	8232 (23 Mag)
Temperatura esterna di progetto di riscaldamento	[°C]	6.8
Temperatura esterna di progetto di raffrescamento	[°C]	33.5

Tab. 5.5.2.1: Principali dati geografici e climatici di Palermo [74]

L'edificio oggetto di studio si sviluppa su due livelli (520 x 2 m²). Le principali caratteristiche geometriche richieste e le portate d'aria per le varie destinazioni degli ambienti sono riportate nella Tab. 5.5.2.3. Il modello tridimensionale è mostrato in Fig. 5.5.2.2.

Destinazione d'uso ambienti	Superficie di calpestio [m ²]	Superficie pareti [m ²]	Superficie finestre [m ²]	Portata d'aria esterna [m ³ /h]	Livello di occupazione [m ² per persona]
PT – bar/ristorante	42.7	57.7	4.70	1352	1.25
PT - biblioteca	129.9	115.2	20.8	1029	5.0
PT - WC1	3.60	4.80	0.85	9.0	16.7
PT - ufficio	36.8	44.1	9.60	87.0	16.7
PT – stanza medica	88.0	94.4	15.3	697	5.0
PT -WC2	22.0	15.5	1.90	52.0	16.7
PT - reception	149.2	72.7	15.1	709	8.30
PT - WC3	13.6	1.0	0	32.0	16.7
P1 - WC1	8.0	21.8	0.50	19.0	16.7
P1- diagnostica	166.6	65.8	15.4	792	8.3
P1 - fisioterapia	90.8	77.4	6.50	719	5.0
P1 - stanza medica	29.5	42.2	4.25	233	5.0
P1 - WC2	10.0	19.0	1.90	24.0	16.7
P1 - stanza medica	16.1	33.1	9.50	83.0	7.7
P1 - consulto 1	34.7	58.7	4.70	275	5.0
P1 – consulto 2	19.0	30.3	4.90	150	5.0
P1 - consulto 3	30.3	34.8	7.40	240	5.0
P1 - sala attesa	51.9	0	0	411	5.0
P1 – consulto 4	28.8	22.3	3.30	228	5.0

Nota: Potenza di illuminazione is 6 W/m² per tutti gli ambienti eccetto per la Reception (8 W/m²).

Tab. 5.5.2.3: Principali caratteristiche geometriche, destinazione d'uso degli ambienti e portate d'aria (PT = piano terra, P1 = piano primo)

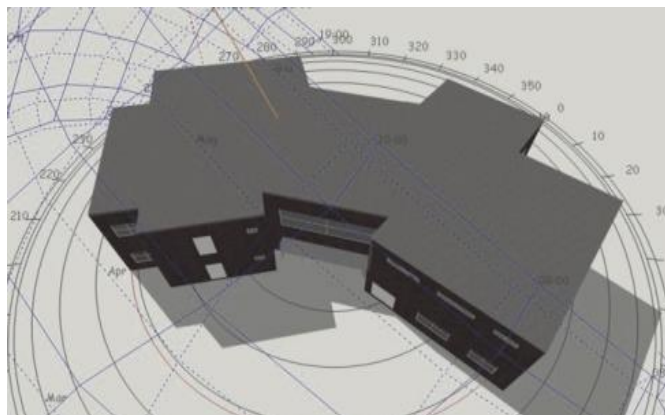


Fig. 5.5.2.2: Edificio oggetto di studio

L'edificio è caratterizzato da:

- pareti di mattoni, con cinque centimetri di strato isolante in poliuretano espanso;
- finestre basso-emissive con doppio vetro ed intercapedine riempita di argon.

Per ridurre i carichi termici dell'edificio sono previste le seguenti basse trasmittanze termiche dei componenti edilizi (Tab. 5.5.2.4.).

	Valori di U [$\text{W/m}^2\text{K}$]
Pareti	0.250
Tetto	0.150
Pavimento di terra	0.150
Finestre	1.850

Tab. 5.5.2.4: Principali caratteristiche termiche dell'involucro edilizio

L'edificio presenta impianti che sfruttano l'energia solare sia indirettamente (tramite una pompa di calore aria-acqua) che direttamente (attraverso pannelli solari fotovoltaici).

Il sistema HVAC è costituito da un impianto di ventilazione meccanica con fan-coils. Inoltre, è prevista l'installazione di uno scambiatore di calore terra-aria (EAHX), che pre-riscalda (in inverno) e pre-raffresca (in estate) l'aria ambiente necessaria per la ventilazione. In tale modo, sia la domanda di energia che le emissioni di CO_2 equivalenti possono essere ridotte.

Lo scambiatore, come visto precedentemente, sfrutta la capacità del terreno di accumulare energia termica, attraverso un sistema di condotti installati nel sottosuolo orizzontalmente.

In estate il terreno presenta una temperatura inferiore a quella dell'aria esterna, mentre in inverno potrebbe avere, in alcune ore/giorni, una temperatura superiore a quella dell'aria esterna.

I condotti sono in calcestruzzo rinforzato (conducibilità termica di 2.5 W/mK) e sono caratterizzati dalle seguenti caratteristiche principali: lunghezza 50 m, spessore di 5 cm, diametro di 30 cm e la profondità di installazione pari a -4 m rispetto al livello del terreno. Questi parametri sono stati scelti sulla base della procedura di ottimizzazione eseguita in [163].

L'impianto fotovoltaico previsto è costituito da pannelli in silicio monocristallino. Per massimizzare il potenziale dei pannelli fotovoltaici, l'angolo di azimut scelto è 0° (cioè

orientamento a sud). Nel lavoro sono considerate tre differenti angoli di tilt (10° , 15° e 32°). Solitamente, alle nostre latitudini, per massimizzare la produzione dell'impianto fotovoltaico viene utilizzato un angolo di inclinazione pari a 32° , ma con il fine di ottenere un NZEB in cui la produzione energetica è realizzata soltanto in loco, è stato previsto un angolo di inclinazione pari a 15° , in modo tale da ottenere un ingombro complessivo ridotto della superficie del tetto (per poter prevedere l'installazione della centrale termo-frigorifera anch'essa in copertura).

Più in dettaglio, questo lavoro di ricerca valuta l'influenza di diverse portate d'aria esterna attraverso l'EAHX oppure mediante un sistema di ventilazione meccanica semplice (MVS) sulla domanda di energia primaria (PE), nonché le prestazioni termiche conseguite con il sistema HVAC ed il relativo impatto ambientale.

In dettaglio, sono valutati l'autosufficienza energetica mediante il sistema fotovoltaico (solo in loco) ed il numero di pannelli fotovoltaici richiesto (considerando pannelli più efficienti ed altri tradizionali).

Nella prima fase, sono fornite dieci diverse alternative, variando la portata di aria esterna che attraversa l'EAHX. Il caso di riferimento (variante n. 0) garantisce la portata d'aria esterna minima richiesta per ogni locale. Poi, vengono mostrati i confronti tra i dieci casi e quello di riferimento.

Nella seconda fase, viene confrontato un altro caso di riferimento (portata d'aria esterna minima attraverso il sistema MVS senza EAHX) con le undici alternative in cui è presente l'EAHX (casi 0-10, riportati nella prima fase).

5.5.3 Risultati conseguiti e confronto tra un impianto di ventilazione meccanica tradizionale (MVS) ed uno dotato di scambiatore terra-aria (EAHX)

In questo paragrafo sono mostrati i risultati ottenuti dal punto di vista energetico ed ambientale. Inoltre, è svolta un'analisi di sensitività per valutare l'incidenza della portata d'aria esterna che attraversa l'EAHX e l'impianto MVS.

Il caso di riferimento (variante n. 0) garantisce la portata minima d'aria esterna per ogni locale, come riportato in Tab. 5.5.3.1. Questa è stata valutata tenendo conto degli occupanti, la destinazione d'uso dell'ambiente e la necessità di una soddisfacente qualità dell'aria interna.

5.5.3.1 Analisi energetica ed ambientale

In Fig. 5.5.3.1.1, è riportata l'energia primaria annuale necessaria per ogni alternativa considerata. In condizioni estive, l'aumento del flusso d'aria attraverso l'EAHX riduce il fabbisogno di energia primaria per il raffreddamento (PE_C), mentre avviene il contrario per la stagione invernale (PE_H).

Pertanto, considerando l'analisi annuale, la minimizzazione dell'energia primaria (PE_y) necessaria sia per il riscaldamento che per il raffrescamento si ottiene quando è prevista la portata minima d'aria per la stagione invernale e quella massima nella stagione estiva (cioè maggiorata del 50 % rispetto al valore invernale, variante n. 1).

Variante	Inverno	Primavera	Estate	Autunno
0	Min	Min	Min	Min
1	Min	Min*1.25	Min*1.5	Min*1.25
2	Min*1.34	Min*1.67	Min*2.0	Min*1.67
3	Min*1.2	Min*1.5	Min*1.8	Min*1.5
4	Min	Min*1.2	Min*1.4	Min*1.2
5	Min*1.2	Min*1.44	Min*1.68	Min*1.44
6	Min*1.44	Min*1.72	Min*2.0	Min*1.72
7	Min	Min*1.15	Min*1.3	Min*1.15
8	Min*1.2	Min*1.38	Min*1.56	Min*1.38
9	Min*1.54	Min*1.77	Min*2.0	Min*1.77
10	Min	Min	Min*1.5	Min

Tab. 5.5.3.1: Valori delle portate d'aria per il caso di riferimento (n. 0) e per le diverse alternative, considerando le quattro stagioni. La variazione massima della portata d'aria tra inverno ed estate non può superare il 50 %, **al fine di ridurre malfunzionamento aeraulica dei condotti dell'aria.**

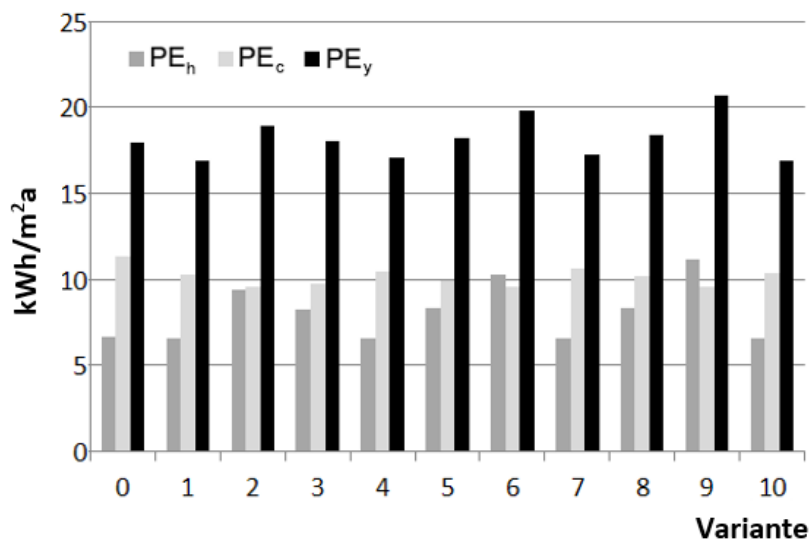


Fig. 5.5.3.1.1: Energia primaria annuale per diverse portate d'aria

Quando si osserva il periodo di riscaldamento (PE_H), il caso peggiore è il n. 9 (+ 67.6 % rispetto al caso di riferimento n. 0), che si contraddistingue per il valore massimo di portata d'aria esterna (min * 1.5), mentre le alternative migliori (0, 1, 4, 7, 10) sono connesse ad un tasso di ventilazione minimo in regime invernale.

In condizioni estive, tutte le varianti determinano vantaggi energetici stagionali rispetto al caso di riferimento (PE_C si riduce del 6.4 % ÷ 16.1 %). Le varianti migliori (2 e 3) presentano le differenze più alte tra le portate d'aria esterna invernale ed estiva. Considerando l'analisi annuale, le varianti n. 1, 4, 7 e 10 mostrano un decremento del PE_Y (4.3 % ÷ 6.4 %), mentre la n. 2, 3, 5, 6, 8, e 9 hanno un impatto negativo sulla PE_Y (aumento del 0.3 % ÷ 14.8 %).

Il caso migliore è la variante n. 1, che riduce il PE_Y di circa 6.4 %. In questo caso, il fabbisogno di energia elettrica globale annuo è pari a 31'200 kWh. Per produrre la stessa quantità di energia elettrica mediante il sistema fotovoltaico (in modo tale da avere una richiesta di energia primaria non rinnovabile pari a 0 kWh/m²a), si rendono necessari 65 moduli fotovoltaici in silicio monocristallino, con una potenza di picco complessiva di 21.3 kWp (ogni pannello ha una potenza di 327 Wp). Quando si considerano moduli tradizionali, quindi, meno potenti (245 Wp), sono indispensabili almeno 88 moduli.

Come mostrato nelle Figs. 5.5.3.1.2a-b, in entrambi i casi, la superficie disponibile sul tetto dell'edificio per il sistema fotovoltaico e la centrale termo-frigorifera è sufficiente (si noti che, anche se non mostrato in Fig. 5.5.3.1.2, lo spazio necessario per la centrale termo-frigorifera è stato preso in considerazione).

Pertanto, l'attività di ricerca ha dimostrato che è possibile ottenere un NZEB, utilizzando solo in loco sistemi di energia rinnovabile.

Un confronto tra la domanda di energia elettrica mensile e la produzione di energia elettrica con l'impianto fotovoltaico è riportato in Fig. 5.5.3.1.3, con riferimento alla variante 1. Il bilancio annuale viene effettuato, considerando l'energia finale erogata ed è soddisfatto perché il bisogno di energia elettrica è pari a 31'200 kWh (30 kWh/m²), mentre il sistema fotovoltaico ne produce 31'300 kWh (con angolo di inclinazione di 15 °).

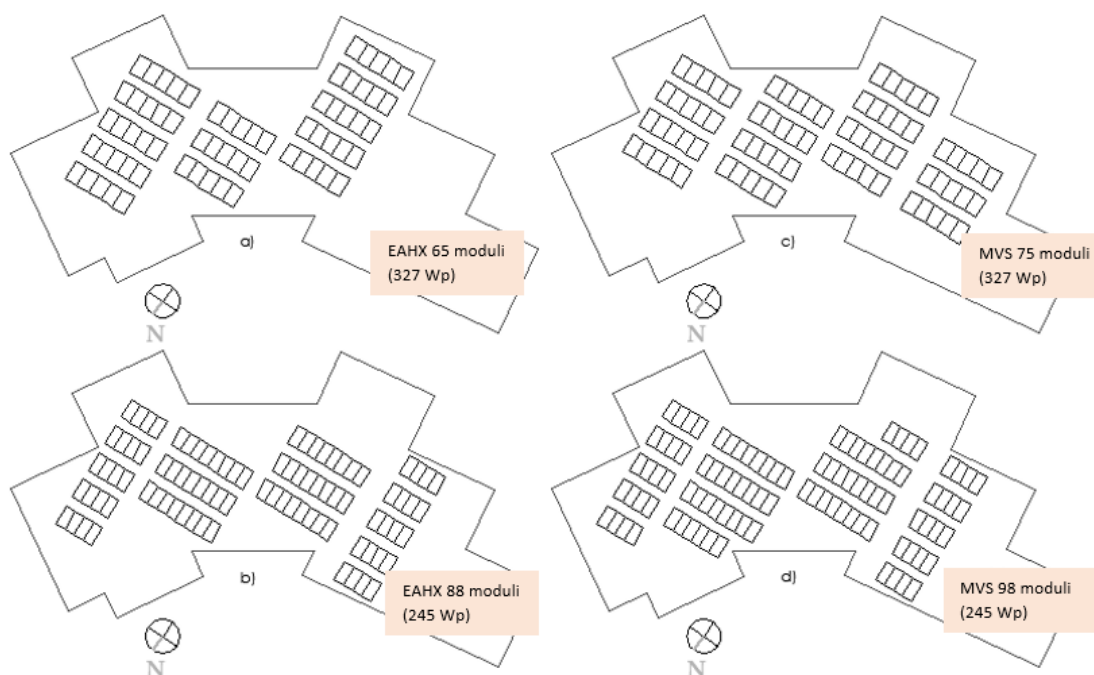


Fig. 5.5.3.1.2: Pianta della copertura con impianto fotovoltaico: a) moduli fotovoltaici con 327 W_p + EAHX; b) moduli fotovoltaici con 245 W_p + EAHX; c) moduli fotovoltaici con 327 W_p senza EAHX; d) moduli fotovoltaici con 245 W_p senza EAHX

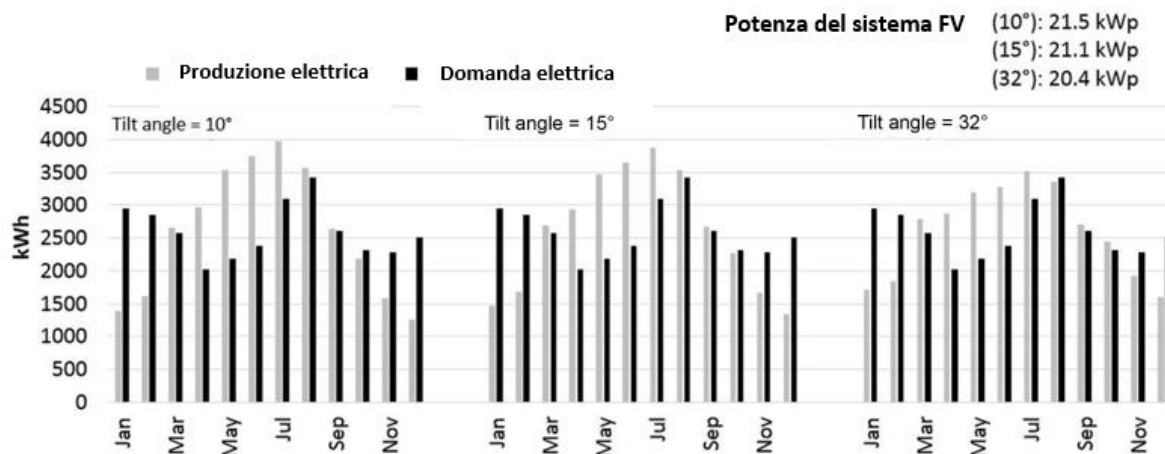


Fig. 5.5.3.1.3: Richiesta energetica elettrica mensile e produzione di energia elettrica mediante l'impianto fotovoltaico

Per quanto riguarda l'impatto ambientale, le emissioni di CO₂ equivalenti annuali sono state valutate, impiegando i fattori di emissione europei Life Cycle Assessment (LCA) [107], vale a dire 0.708 tCO₂-eq/MWh_{el}. I risultati sono riportati in Fig. 5.5.3.1.4.

Le osservazioni, in termini di soluzione migliore e peggiore e le variazioni percentuali rispetto al caso base, sono uguali a quelle relative alla Fig. 5.5.3.1.1.

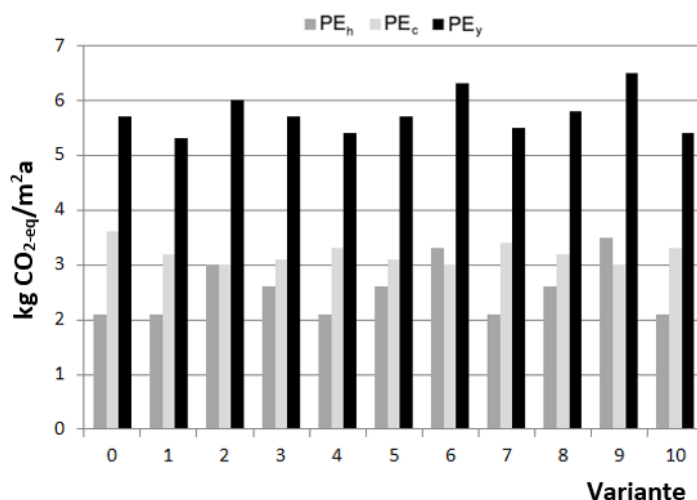


Fig. 5.5.3.1.4: Emissione annuale di anidride carbonica per ciascuna variante

5.5.3.2 Analisi delle prestazioni termiche

Sono state prese in considerazione anche le prestazioni termiche del sistema HVAC.

La Fig. 5.5.3.2.1 mostra il numero di ore in cui il set point di temperatura interna non è soddisfatto durante il periodo di occupazione sia in regime invernale che estivo.

Nel dettaglio, questo indicatore termico (chiamato "Time set point non met") illustra per quante ore la temperatura dell'aria interna è al di fuori del campo di set point sia in condizioni

invernali che estive (20 ± 0.20 °C in fase di riscaldamento, 26 ± 0.20 °C durante la stagione di raffrescamento).

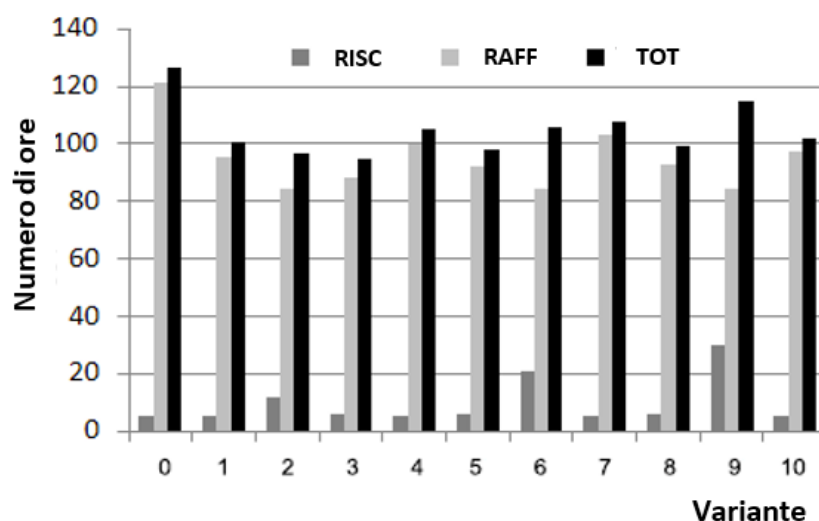


Fig. 5.5.3.2.1: Numero di ore in cui non è garantita la temperatura interna di set point durante l'occupazione, per ciascuna variante

Si nota che il set point è garantito in modo migliore in inverno che in estate.

La variante peggiore è la n. 0 (caso di riferimento), che non permette di rispettare il set point per il maggior numero di ore annuali (126.5 h, equivalente al 6.3 % delle ore totali).

La migliore alternativa è la n. 3 (94.5 h pari al 4.7 % delle ore totali); in ogni caso, anche i migliori casi dal punto di vista energetico (varianti 1 e 10) mostrano risultati soddisfacenti. Le percentuali sopra riportate evidenziano che tutte le soluzioni sono adatte per controllare la temperatura dell'aria interna in entrambe le stagioni.

5.5.3.3 Caso con impianto di ventilazione meccanica tradizionale (MVS)

In questa sezione, un altro caso di riferimento è considerato, ossia nell'edificio oggetto di indagine è prevista l'installazione di un sistema MVS tradizionale senza l'EAHX. In tale modo, il caso di base non è più quello con EAHX con minima portata d'aria, ma l'impianto MVS con minima portata d'aria.

Complessivamente sono valutate undici alternative (varianti da 0 a 10 sono quelle descritte in Tab. 5) e vengono confrontate con il nuovo caso di riferimento (Fig. 5.5.3.3.1). Come è possibile notare, il sistema con l'EAHX mostra vantaggi energetici rilevanti rispetto al caso base solo con MVS, soprattutto se si considera la stagione estiva ed i risultati annuali.

In condizioni invernali, le migliori alternative (0, 1, 4, 7 e 10) riducono la domanda di PE_H di circa il 29 %, mentre in condizioni estive, la riduzione di energia è pari al 36 % ÷ 46 %.

Focalizzando l'attenzione sul caso annuale, è possibile conseguire una riduzione di PE_Y in tutti i casi (24 % ÷ 38 %). La variante migliore è la n. 1 (riduce PE_Y del 38 %).

In Fig. 5.5.3.3.2 sono comparate la domanda di energia elettrica mensile e la produzione di energia elettrica con l'impianto fotovoltaico, riferendosi al caso con MVS senza l'EAHX.

Per quanto riguarda l'analisi ambientale (Fig. 5.5.3.3.3), le tendenze, le variazioni percentuali ed i commenti sono i medesimi della Fig. 5.5.3.3.1.

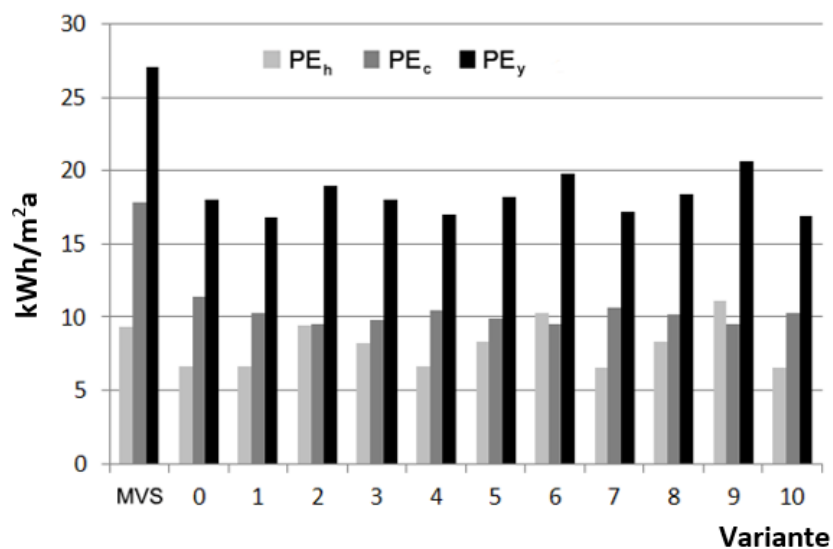


Fig. 5.5.3.3.1: Energia primaria annuale richiesta quando si considera anche il sistema senza EAHX (caso MVS)

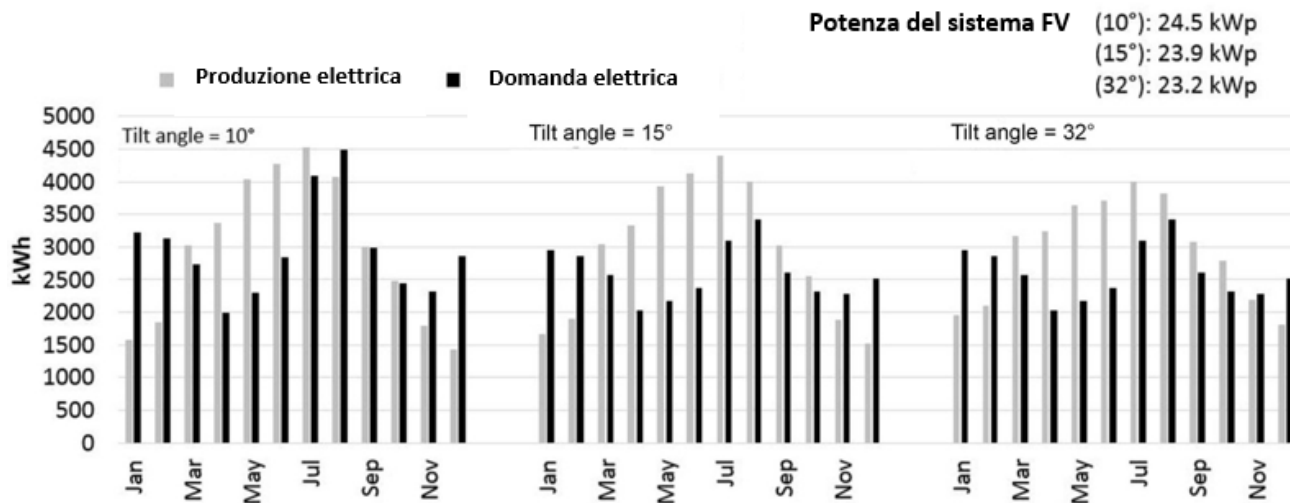


Fig. 5.5.3.3.2: Richiesta energetica elettrica mensile e produzione di energia elettrica mediante l'impianto fotovoltaico

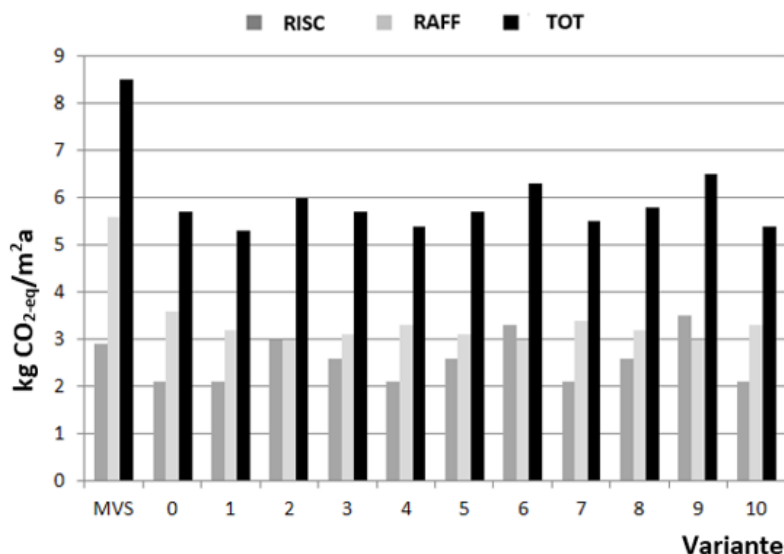


Fig. 5.5.3.3.3: Emissione annuale di anidride carbonica di ciascuna variante, considerando anche il caso senza EAHX (caso MVS)

Nel caso di un semplice sistema meccanico di ventilazione (MVS) senza l'EAHX (richiesta di energia elettrica pari a 35'455 kWh su base annua), occorrono almeno 75 moduli fotovoltaici in silicio monocristallino per ottenere un NZEB. La potenza di picco è di circa 24 kWp (se si considerano moduli fotovoltaici con 327 Wp ed angolo di inclinazione pari al 15 °).

Utilizzando i moduli meno potenti (245 Wp), sono necessari almeno 98 moduli. Come mostrato nelle Fig. 5.5.3.1.2c/d, in entrambi i casi, la superficie disponibile sul tetto dell'edificio per il sistema fotovoltaico e la centrale termo-frigorifera è appena sufficiente, e la richiesta di energia elettrica è circa pari alla produzione di energia elettrica.

Conclusioni

L'attività di ricerca svolta in questi anni di Dottorato, presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII), sezione ETEC, dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, ha condotto al lavoro di Tesi presentato, dal titolo *“Ottimizzazione del sistema edificio-impianto: tecniche passive ed attive per la riduzione della richiesta energetica, dei costi di gestione e dell'impatto ambientale”*.

Questo lavoro di Tesi si inquadra nell'ambito dell'attività di ricerca correlata all'ottimizzazione/miglioramento dell'efficienza energetica in edilizia, ampiamente descritta nei vari capitoli, in cui sono stati evidenziati i principali settori, che incidono maggiormente sul bilancio energetico nazionale ed internazionale e, dunque, sul problema ambientale.

L'approfondimento di tutte queste tematiche ha permesso di analizzare in modo critico il contesto normativo e legislativo riguardante l'efficienza energetica in edilizia, mettendo in evidenza le potenzialità di questo settore sia con riferimento alla progettazione ex-novo che soprattutto alla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio.

La principale attività di ricerca portata avanti ed i risultati conseguiti riguardano lo studio di alcune strategie passive ed attive per il miglioramento del bilancio energetico del sistema edificio-impianti.

In particolare, diverse azioni di ottimizzazione dell'efficienza energetica, sia su edifici esistenti che su quelli di nuova costruzione, sono state analizzate per ridurre il fabbisogno energetico degli edifici connesso sia al riscaldamento invernale che alla climatizzazione estiva, per minimizzare i costi di gestione, l'impatto ambientale e per migliorare il comfort ambientale negli spazi confinati.

L'attività di ricerca, che è stata prettamente di tipo modellistico/numerico, ha riguardato sia edifici di nuova costruzione che edifici esistenti, con riferimento alla realtà italiana ed a quella di altre città europee.

Il principale fine del lavoro svolto è stato duplice:

1. valutare le potenzialità o le criticità derivanti dall'applicazione di diverse azioni di ottimizzazione dell'efficienza energetica del sistema edificio-impianti;
2. estendere l'attività di ricerca ad edifici di riferimento (di nuova costruzione ed esistenti) rappresentativi del patrimonio edilizio italiano/europeo, sia in termini di tipologia costruttiva edilizia che impiantistica, in modo da allargare l'indagine ad una scala territoriale più ampia.

La prima attività svolta (indagine energetica su finiture superficiali innovative da applicare ad attici soprattutto nei centri storici) deriva dall'individuazione di alcune problematiche riscontrate nel settore edilizio, dalla direzione intrapresa dalla legislazione nazionale in materia di recupero dei sottotetti, sia per ridurre il consumo di territorio che per minimizzare le richieste energetiche, e dalla carenza derivante dalla letteratura scientifica (con riferimento ad esempio allo studio dell'incidenza di finiture superficiali innovative su base annuale e non soltanto su base stagionale).

In particolare, partendo da dati statistici, è stato individuato il mercato potenziale italiano per la riqualificazione energetica edilizia ed è stato, quindi, fissato l'oggetto su cui svolgere la prima attività di ricerca, ovvero gli attici/sottotetti, che presentano pessime prestazioni energetico-ambientali. Infatti, gli attici sono unità ambientali adibite originariamente a deposito o a spazio cuscinetto e, quindi, sono sorti con funzioni differenti da quelle abitative e sono caratterizzati da diverse criticità, quali: altezze ridotte, superficie abitabile correlata all'altezza, scarso isolamento termico, bassa inerzia termica e basso fattore di riflessione solare delle superfici esterne. Per tale motivo, è utile lo studio di particolari finiture superficiali, a basso costo, a ridotto spessore e compatibili dal punto di vista architettonico.

Una volta definite le criticità, sono stati determinati alcuni interventi che consentono di migliorare le prestazioni energetiche degli attici, perseguendo gli obiettivi di semplicità di applicazione, economicità, riduzione degli spessori dei materiali isolanti e compatibilità dal punto di vista architettonico.

Per questi edifici è stata valutata l'incidenza di alcune finiture superficiali interne ed esterne innovative sulla richiesta energetica stagionale ed annuale relativa alla climatizzazione invernale/estiva, sui costi energetici di gestione, sull'impatto ambientale e sul miglioramento del comfort ambientale.

Sulla base di dati di letteratura, di indagini statistiche e dei risultati del progetto di ricerca europeo IEE TABULA, sono stati definiti degli edifici di riferimento del settore residenziale (uno per l'Italia, uno per la Spagna, uno per Francia-Germania-Regno Unito ed uno per la Svezia), per il periodo temporale di costruzione 1950-1960, al fine di estendere la ricerca ad edifici rappresentativi del parco edilizio esistente per funzionalità, caratteristiche tipologico-costruttive e condizioni climatiche.

È stato approfondito il tema inerente le finiture superficiali innovative, impiegando rivestimenti ad alto fattore di riflessione solare per le superfici esterne ed integrando le nanotecnologie nei comuni materiali edili per ottenere finiture superficiali a bassa emissività nel campo dell'infrarosso da applicare sulle superfici interne dell'involucro edilizio.

Lo studio è stato effettuato sia per edifici non isolati che isolati.

I risultati relativi alla valutazione dell'energia primaria (PE) evidenziano che gli interventi sulle superfici esterne sono:

- adatti per i più caldi: infatti, PE è ridotto del 11.8 -13.1 % (Siviglia e Palermo) (invece, l'energia termica su base annuale è ridotta del 17.3-20.4 %);
- svantaggiosi per Roma e per i climi freddi (PE annuale: aumento di 0.1-4.2 %).

Al contrario, le azioni sulle superfici interne (oppure quelle combinate intonaco interno + vernici esterne) risultano essere vantaggiose per tutti i climi analizzati (PE annuale diminuisce del 6.3-25.1 %).

L'effetto dell'isolamento termico è molto evidente quando si osservano i risultati conseguibili con l'intonaco interno basso-missivo; infatti, a Milano si può notare che PE_h si riduce del:

- 12.4 %, nel caso di involucro edilizio non isolato;
- 8.7 %, considerando uno spessore di isolante termico pari a 3 cm;
- 6.8 %, nel caso di involucro mediamente isolato (5 cm).

In questa attività, è stato determinato un parametro nuovo, che è stato denominato “Coating Factor”, in grado di descrivere sinteticamente il clima della località considerata e di supportare i progettisti edili sulla scelta delle finiture superficiali ottimali dal punto di vista energetico. Il fattore è stato suddiviso in OCF (“outside coating factor”) ed in ICF (“inside coating factor”), in modo da distinguere le strategie progettuali per la scelta delle finiture superficiali esterne da quelle interne.

L’OCF, ad esempio, mette in luce che, per valori positivi ricadenti nel range $[0, +2.5]$, ossia in quelle località caratterizzate da un clima molto caldo, il progettista deve privilegiare le finiture superficiali esterne con un alto fattore α_{sol} ed un’alta ϵ_{inf} , mentre un fattore OCF negativo, ovvero, prendendo in esame l’intervallo $[-0.5, -2.5]$ si rende più opportuno indirizzare la scelta verso quelle finiture superficiali esterne contraddistinte da valori bassi di ρ_{sol} e di ϵ_{inf} .

La zona che presenta un OFC con range $[0, -0.5]$ è un’area in cui si presenta una debole dipendenza tra le prestazioni energetiche dell’edificio e le caratteristiche spettrali dei rivestimenti dei vari componenti edilizi opachi; pertanto, occorre valutare con attenzione l’applicazione delle finiture superficiali in funzione dell’obiettivo da raggiungere e, quindi, bisogna analizzare attentamente caso per caso.

Lo studio è stato applicato anche ad una scala territoriale più ampia, in modo da poter valutare i possibili risparmi energetici e l’impatto positivo sull’ambiente derivante dall’applicazione delle suddette azioni di riqualificazione energetica sul 25 % degli edifici con tetto a falde del Sud Italia.

L’evoluzione legislativa e normativa, negli anni, ha subito un forte cambiamento; difatti, si è assistito ad un passaggio da un sistema basato su un limite “prescrittivo”, in funzione della tipologia di interventi edilizi da effettuare, ad un sistema “prestazionale”, in cui le prestazioni energetiche dell’edificio oggetto di studio devono essere confrontate con quelle di un edificio di riferimento, come richiesto dalla metodologia innovativa del “Cost-optimal”, introdotto dalla Direttiva 2010/31/EU, integrata dal Regolamento delegato 244/2012.

Nell’ambito della seconda attività di ricerca è stato indagato lo spessore ottimale dell’isolamento termico in funzione dei carichi termici interni, considerando anche la suddetta metodologia innovativa del “Cost-optimal”.

La seconda attività è stata rivolta al settore terziario, con particolare riferimento agli edifici adibiti ad uso uffici (1950-1960), in quanto si tratta di un settore fortemente energivoro e caratterizzato da un’evoluzione dei fabbisogni energetici sempre più critica.

Dalla letteratura risulta che, tra le possibili strategie passive d’intervento per ridurre il fabbisogno energetico, la posa in opera di uno o più strati di materiale coibente sull’involucro edilizio opaco è tra le più diffuse. Tuttavia, l’applicazione acritica di notevoli spessori di materiale isolante potrebbe comportare conseguenze controproducenti, sia sotto il profilo energetico/ambientale, sia sotto il profilo economico. Infatti, nel caso di edifici caratterizzati da elevati carichi termici interni, come appunto gli uffici, e/o gli edifici siti in località calde, bassi valori della trasmittanza termica stazionaria dei componenti edilizi opachi e, dunque, elevati spessori di isolante termico, potrebbero generare un aumento della domanda energetica per la climatizzazione estiva superiore alla riduzione energetica per il riscaldamento invernale.

Pertanto, le difficoltà per l'involucro edilizio troppo isolato di smaltire l'energia termica verso l'ambiente esterno in estate potrebbero rendere nulli, o quasi, i vantaggi dovuti alla riduzione delle dispersioni termiche nei periodi freddi.

Da tali motivazioni deriva questo studio, volto a valutare lo spessore ottimale di isolante termico mediante una metodologia innovativa, quella del "Cost-optimal", che consente di mettere in gioco non soltanto l'aspetto energetico, ma anche altre variabili, tra cui costi ed impatto ambientale.

Ai sensi della Direttiva 2010/31/EU, il "livello ottimale in funzione del costo" deve essere determinato considerando il costo globale valutato durante l'intero ciclo di vita economico di un edificio e tenendo presente i seguenti costi: costi di investimento per le misure di miglioramento dell'efficienza energetica, costi di manutenzione, funzionamento e sostituzione, costi di smaltimento e costo associato alle emissioni inquinanti, ovvero il valore monetario del danno ambientale causato dalle emissioni di CO₂ connesse al consumo di energia nell'edificio.

Dai risultati energetici è possibile notare che la soluzione migliore è quella con involucro edilizio isolato eccetto il pavimento di terra. Il risultato è valido per tutti i tre i livelli di carichi termici interni considerati. Si può osservare inoltre che:

1. in inverno la richiesta energetica diminuisce all'aumentare dello spessore dell'isolante termico;
2. in estate, a circa 2 cm di spessore, si ha un'inversione della curva del fabbisogno energetico;
3. globalmente (costi energetici per climatizzazione invernale ed estiva), la curva segue l'andamento della richiesta energetica estiva in quanto, a Palermo, la climatizzazione estiva pesa maggiormente rispetto a quella invernale.

Dunque, aumentare lo spessore di isolante diventa penalizzante per climi caldi o miti, poiché in alcuni casi (soprattutto in presenza di elevati carichi termici interni) aumentano eccessivamente i consumi energetici connessi alla climatizzazione estiva.

Dai risultati ottenuti, è stato riscontrato che le trasmittanze termiche previste dall'attuale legislazione, entrata in vigore nel 2015 (cosiddetto "Decreto Requisiti Minimi", di attuazione della L.90/2013) determinano costi complessivi più alti rispetto a quelli conseguibili con la legislazione precedente del 2009, oggi abrogata (DPR 59/09), soprattutto per quelle città con clima caldo. Più in generale, i risultati dell'attività di ricerca determinano valori ottimali di spessore di isolante (attorno ai 2-4 cm per Palermo) minori rispetto a quanto si ottiene applicando le prescrizioni legislative degli ultimi anni (5-7 cm): ciò vale soprattutto per città calde ed in presenza di elevati carichi termici interni.

Inoltre, è stata formulata un'innovativa proposta di integrazione del calcolo del costo globale previsto dal Regolamento delegato 244/2012, introducendo un fattore moltiplicativo valutato in funzione dell'indice di comfort PMV ("Predicted Mean Vote", cioè voto medio previsto). Tale proposta è stata considerata perché i risultati mostrano che, a volte, la soluzione ottimale in funzione dei costi non sempre determina un ambiente confortevole per l'utenza.

Il coefficiente diviene riduttivo nei casi in cui il comfort è accettabile ($PMV \pm 0.7$) e si trasforma in coefficiente amplificativo nei casi in cui il comfort supera il livello di accettabilità, in modo tale da poter rendere confrontabili le diverse soluzioni (anche dal punto di vista del comfort). Ad esempio, nel caso di un PMV accettabile (pari a 0.5), si applicherà un coefficiente

riduttivo pari a 0.9; invece, nel caso di un PMV non accettabile (pari a 1.5) verrà applicato un coefficiente amplificativo pari a 1.2.

Dunque, il coefficiente, ottenuto in base al valore assoluto dell'indice PMV (relativo alla stagione predominante), consente di amplificare il costo globale di una soluzione non ottimale in termini di comfort.

Analizzando il caso di Milano, l'edificio tutto isolato presenta un indice PMV medio, in un giorno tipico invernale (21 gennaio), pari a -0.65, mentre l'edificio tutto isolato eccetto il pavimento di terra presenta un PMV medio pari a -0.97. Pertanto, al caso più sfavorevole dal punto di vista del comfort ambientale, ossia quello con l'involucro edilizio tutto isolato eccetto il pavimento si propone di applicare un coefficiente F_{PMV} amplificativo pari a 1.1.

Invece, per il caso di Palermo la soluzione ottimale risulterà sempre quella dove l'involucro edilizio è tutto isolato eccetto il pavimento di terra, ce diviene un elemento che “scarica” energia termica verso il terreno.

La terza attività di ricerca svolta ha valutato gli effetti di alcune tipologie di scambiatori di calore sulle richieste energetiche stagionali ed annuali per la climatizzazione di tre edifici di riferimento di nuova costruzione.

Sono stati studiati gli scambiatori terra-aria e gli scambiatori aria-aria, in differenti località europee, per determinare la soluzione ottimale in funzione dell'obiettivo da raggiungere, ossia minimizzare il consumo energetico per il raffrescamento estivo o per il riscaldamento invernale, oppure la somma di entrambi. Gli scambiatori sono stati opportunamente inseriti all'interno di impianti di climatizzazione invernale/estiva idonei.

Le analisi sono state condotte considerando, per lo scambiatore terra-aria, diverse tipologie di terreno, installazioni a diverse profondità, diverse dimensioni dei condotti (lunghezza, raggio) e vari tipi di controllo automatico.

Riguardo agli scambiatori terra-aria, come analisi preliminare è stato impiegato il software GAEA, basato sul calcolo analitico dello scambio energetico tra il terreno e l'aria nei condotti.

Tutte le altre analisi sono state svolte impiegando il codice di calcolo Energyplus.

Sono stati valutati i consumi di energia elettrica connessi alla climatizzazione invernale ed estiva, con e senza l'ausilio degli scambiatori di calore aria-aria e terra-aria.

I risultati ottenuti mostrano l'efficacia dello scambiatore aria-aria e di quello terra-aria sia in regime estivo, che in quello invernale ed annuale. In particolare, lo scambiatore aria-aria induce migliori prestazioni energetiche in regime invernale, mentre la presenza dello scambiatore terra-aria consente di ridurre maggiormente il fabbisogno energetico estivo.

L'attività di ricerca ha anche previsto una soluzione impiantistica che prevede l'utilizzo di entrambi gli scambiatori di calore facendoli funzionare uno in inverno (scambiatore aria-aria) e l'altro in estate (scambiatore terra-aria): tale configurazione consente di conseguire alti livelli di risparmio energetico su base annuale.

A Palermo si nota che la presenza dello scambiatore aria-aria induce migliori prestazioni in regime invernale (riduzione del fabbisogno di energia elettrica per il riscaldamento del 97 %), mentre la presenza dello scambiatore terra-aria consente di ridurre maggiormente il fabbisogno energetico estivo (riduzione del fabbisogno energetico di raffrescamento del 46 %). Prevedendo l'utilizzo di entrambi gli scambiatori di calore e facendoli funzionare uno in inverno (scambiatore aria-aria) e l'altro in estate (scambiatore terra-aria), è possibile conseguire un risparmio

energetico globale pari al 59 %. Inoltre, è possibile evidenziare che più il clima risulta rigido, maggiormente la soluzione combinata scambiatore di calore aria-aria e terra-aria risulta migliore, ovvero la percentuale di riduzione globale passa da 59 % (Palermo), a 74 % (Milano), a 79 % (Berlino).

La quarta attività di ricerca riguarda lo studio dei cosiddetti “nearly Zero Energy Buildings” (nZEBs), cioè edifici a energia quasi zero.

Tale concetto di edificio è stato introdotto dalla Direttiva Europea 31/2010/EU al fine di ridurre al minimo il fabbisogno energetico degli edifici e di rispettare gli obiettivi posti dai diversi accordi internazionali, a partire dal protocollo di Kyoto, relativi alla minimizzazione delle emissioni nocive in atmosfera.

Dal concetto di nZEB deriva quello di “Net Zero Energy Building” (NZEB), ovvero edifici in cui la richiesta di energia primaria non rinnovabile è pari a 0 kWh/m²a.

Lo studio dei NZEBs è fondamentale almeno per due motivi interconnessi: in tutti i settori, la domanda di energia degli edifici è destinata ad aumentare (ad esempio, in Europa, gli edifici commerciali e residenziali utilizzano circa il 40 % dell’energia primaria globale e producono il 36 % delle emissioni di CO₂); a partire dal 1° gennaio 2021 (2019 nel caso di edifici pubblici), in tutta Europa i nuovi edifici dovranno essere necessariamente del tipo nZEB in base alla legislazione vigente.

In un nZEB occorre ridurre al minimo il fabbisogno energetico con tecniche passive ed attive, comprese quelle che utilizzano le fonti di energia rinnovabili, il che rappresenta l’approccio fondamentale che ingloba completamente l’attività di ricerca svolta in questo lavoro di Tesi.

Si è tenuto conto delle indicazioni della norma UNI EN 15603, che definisce il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile di un edificio come la differenza tra l’energia importata e quella esportata. Lo studio ha valutato, quindi, la possibilità di ottenere un NZEB a Palermo, utilizzando energia rinnovabile prodotta in loco.

L’attività di ricerca ha previsto la riduzione del fabbisogno termico dell’edificio mediante l’utilizzo di componenti opachi e trasparenti con elevate prestazioni termiche. Inoltre, l’adozione di impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili (impianto fotovoltaico) consente di coprire quasi totalmente la richiesta di energia elettrica.

L’impianto di riscaldamento/raffrescamento è costituito da una pompa di calore trivalente (riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria) del tipo aria-acqua, oltre a mobiletti ventilconvettori (“fan-coil”) e ventilazione meccanica.

Il cuore dello studio si è incentrato su uno scambiatore terra-aria che consente di preriscaldare l’aria in regime invernale e di raffrescare l’aria in regime estivo. Sono state svolte analisi di sensibilità per valutare l’incidenza della portata d’aria veicolata attraverso lo scambiatore terra-aria (dal punto di vista energetico, ambientale e relativamente al comfort termico).

Si tenga presente che l’aumento della portata d’aria in regime estivo riduce la richiesta frigorifera, in quanto la temperatura del terreno è molto inferiore alla temperatura dell’aria esterna; pertanto, risulta essere un’azione favorevole. L’aumento della portata d’aria in regime invernale, invece, determina un incremento della richiesta energetica stagionale di riscaldamento.

Pertanto, considerando l’analisi annuale, la minimizzazione dell’energia primaria (PE_y) necessaria sia per il riscaldamento che per il raffrescamento si ottiene quando è prevista la portata

minima d'aria per la stagione invernale e quella massima nella stagione estiva (cioè maggiorata del 50 % rispetto al valore invernale, variante n. 1).

Quando si osserva il periodo di riscaldamento (PE_H), il caso peggiore è il n. 9 (+ 67.6 % rispetto al caso di riferimento n. 0), che si contraddistingue per il valore massimo di portata d'aria esterna ($\min * 1.5$), mentre le alternative migliori (0, 1, 4, 7, 10) sono connesse ad un tasso di ventilazione minimo in regime invernale.

In condizioni estive, tutte le varianti determinano vantaggi energetici stagionali rispetto al caso di riferimento (PE_C si riduce del 6.4 % ÷ 16.1 %). Le varianti migliori (2 e 3) presentano le differenze più alte tra le portate d'aria esterna invernale ed estiva. Considerando l'analisi annuale, le varianti n. 1, 4, 7 e 10 mostrano un decremento del PE_Y (4.3 % ÷ 6.4 %), mentre la n. 2, 3, 5, 6, 8, e 9 hanno un impatto negativo sulla PE_Y (aumento del 0.3 % ÷ 14.8 %).

Il caso migliore è la variante n. 1, che riduce il PE_Y di circa 6.4 %. In questo caso, il fabbisogno di energia elettrica globale annuo è pari a 31'200 kWh. Per produrre la stessa quantità di energia elettrica mediante il sistema fotovoltaico (in modo tale da avere una richiesta di energia primaria non rinnovabile pari a 0 kWh/m²a), si rendono necessari 65 moduli fotovoltaici in silicio monocristallino, con una potenza di picco complessiva di 21.3 kWp (ogni pannello ha una potenza di 327 Wp). Quando si considerano moduli tradizionali, quindi, meno potenti (245 Wp), sono indispensabili almeno 88 moduli.

L'attività di ricerca ha dimostrato che è possibile ottenere un NZEB, utilizzando solo in loco sistemi di energia rinnovabile.

Riferimenti

- [1] «BP Statistical Review of World Energy,» June 2014.
- [2] Odyssee-Mure, «Energy efficiency policies in the EU/Lessons from the Odyssee-Mure Project,» Disponibile online (www.odyssee-indicators.org/publications/PDF/MURE-Overall-Policy-Brochure.pdf), September 2013.
- [3] IEA, «World Energy Outlook 2011 (WEO11),» 2011.
- [4] E. J. EDGAR, «Trends in global CO2 emissions,» 2014.
- [5] *Giornale La Repubblica*, 25 novembre 2000.
- [6] A. Carotenuto, F. Cascetta, A. Cesarano, O. Manca, Esercitazioni di termodinamica, Cuen, 1989 .
- [7] G. Galletta, V. Sergi, Astrobiologia: le frontiere della vita, Hoepli Editore, 2005.
- [8] F. Selleri, Le forme dell'energia, Franco Selleri, Le forme dell'energia, Edizione Dedalo, 2001.
- [9] World Commission, «Our Common Future, Brundtland Report,» United Nations , 1987.
- [10] E. Tiezzi, N. Marchettini, «Che cos'è lo sviluppo sostenibile?,» Donzelli Editore, 1999.
- [11] L. F. Girard, P. Nijkamp, «Le valutazioni per lo sviluppo sostenibile della città e del territorio,» Franco Angeli, 1997.
- [12] J. Rifkin, The End of Work. The Decline of the Global Labor Force and the Dawn of the Post-Market Era, 1995.
- [13] P. Greco, G. Montesano, Vento per l'energia: prospettive dell'energia eolica in Italia, 1990.
- [14] European Parliament, *European Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings*, 16 Dicembre 2002.
- [15] Parlamento della Repubblica Italiana, *Decreto legislativo del 19 Agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia (G.U. n. 222 del 03.09.2005).*.

- [16] European Parliament, *European Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast)*, 19 Maggio 2010.
- [17] European Parliament, *European Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC*, 25 Ottobre 2012..
- [18] Commission of the European Communities, *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the regions: 20 20 by 2020, Europe's climate change opportunity*. COM, 2008.
- [19] Rinnovabili&Territorio, «Distretto delle energie rinnovabili,» 04 11 2014. [Online]. Available: <http://www.distrettoenergieirinnovabili.it/der/s/rinnovabili-territorio/nuovo-pacchetto-clima-energia-per-l2019europa-al-2030>.
- [20] Commission of the European Communities, *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the regions: A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*. COM (2011) 112, 8 marzo 2011.
- [21] European Parliament, *Commission of the European Communities. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the regions: Energy Efficiency Plan 2011*. COM (2011) 109, 2011.
- [22] Commission of the European Communities, *Communication from the Commission. Energy efficiency: delivering the 20% target*. COM (2008) 772, 2008.
- [23] European Commission, *Impact assessment. Accompanying document to the Energy Efficiency Plan 2011*. SEC (2011) 277, 2011.
- [24] Ecorys, Ecofys and BioIntelligence: *Study to Support the Impact Assessment for the EU Energy Saving Action Plan*, 2011.
- [25] Odyssee, «Indicatori Odyssee,» [Online]. Available: www.buildup.eu.
- [26] Parlamento della Repubblica Italiana, *Legge del 30 Aprile 1976, n. 373. Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici (GU n.148 del 7-6-1976)*.
- [27] G. Caterina (a cura di), *Per una Cultura Manutentiva*, Liguori Editore, 2005.

- [28] Ministero dello Sviluppo Economico, *Bilancio di Sintesi dell'energia in Italia, dati provvisori*, 26 Aprile 2013.
- [29] Ministero dello Sviluppo Economico. Direzione Generale per la sicurezza dell'approvvigionamento e le infrastrutture energetiche, *La situazione energetica nazionale*, 2015.
- [30] ENEA, «Rapporto Annuale Efficienza Energetica, Dicembre 2012».
- [31] ENEA, «Rapporto Energia e Ambiente 2012, Volume "I dati",» 2012.
- [32] Ministero dello Sviluppo Economico, «PAEE 2011: Piano d'Azione Efficienza Energetica,» Luglio 2011.
- [33] Parlamento della Repubblica Italiana, «SEN. Strategia Energetica Nazionale: per un'energia più competitiva e sostenibile,» Marzo 2013.
- [34] Camera dei deputati, XVII Legislatura, «La politica energetica italiana nella XVII legislatura, Dossier n° 163,» 31 marzo 2015.
- [35] CRESME, «RIUSO03, Ristrutturazione edilizia, Riqualificazione energetica, Rigenerazione urbana.,» febbraio 2014.
- [36] CRESME, «Il potenziale (espresso e inespresso) dell'attività di riqualificazione,» 6 Giugno 2012.
- [37] «Elaborazioni e stime CRESME su dati ISTAT Censimento 2001 e indagine alle famiglie 2012».
- [38] ISTAT, «15° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni,» 2011.
- [39] CNA, CRESME, «Mercato della riqualificazione e stima degli effetti degli incentivi fiscali. Il ruolo del rinnovo edilizio, l'influenza dei provvedimenti di defiscalizzazione, l'impatto sul bilancio dello Stato,» Roma, Maggio 2013.
- [40] ENEA, «Rapporto Annuale Efficienza Energetica,» 2015.
- [41] CRESME, F.I.V.R.A., «Valutazione della convenienza e dell'impatto economico dell'isolamento termo-acustico degli edifici,» settembre 2014.
- [42] Commissione Europea, *Decisione di esecuzione della Commissione del 29.10.2014 che approva determinati elementi dell'accordo di partenariato con l'Italia, C(2014)8021*, 2014.

- [43] Parlamento della Repubblica Italiana, *Decreto legislativo del 29 Dicembre 2006, n. 311. Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico*, 2005.
- [44] Parlamento della Repubblica Italiana, *Legge del 3 Agosto 2013, n.90. Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63, recante disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010*, GU Serie Generale n.181 del 3-8-2013.
- [45] European Parliament, *Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings*, 2012.
- [46] Parlamento della Repubblica Italiana, *Legge 190/2014, Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato*, 2014.
- [47] Parlamento della Repubblica Italiana, *Decreto Ministeriale del 26 Giugno 2009. Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*, G.U. n. 158 del 10.7.2009.
- [48] V. Corrado, I. Ballarini, S. Paduos con un contributo di C. Becchio, E. Fabrizio, M. Filippi, V. Monetti, *Sviluppo della metodologia comparativa costoptimal secondo la Direttiva 2010/31/UE*.
- [49] S. P. Corgnati, E. Fabrizio, M. Filippi, V. Monetti, *Livelli di prestazione energetica ottimali per edifici a energia quasi zero: creazione degli edifici di riferimento. Contributo in Atti di Convegno: 67° Congresso Nazionale ATI*, Trieste, 11-14 Settembre .
- [50] BPIE. [Online]. Available: <http://www.bpie.eu/>.
- [51] BPIE, «Principles for Nearly Zero Energy Buildings. Paving the way for effective implementation of policy requirements,» Novembre 2011.
- [52] «IEE Project TABULA (2009 - 2012),» [Online]. Available: <http://episcopo.eu/iee-project/tabula/>.
- [53] «TABULA webtool,» [Online]. Available: <http://webtool.building-typology.eu/>.
- [54] V. Corrado, I. Ballarini, S. P. Corgnati, «Building Typology Brochure – Italy. Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana, nuova edizione, Italian TABULA,» Luglio 2014.
- [55] ENEA. [Online]. Available: http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/edifici-pa/2012/rds-2013-144.pdf.

- [56] European Council, *European Council for an Energy Efficient Economy. Cost optimal building performance requirements Calculation methodology for reporting on national energy performance requirements on the basis of cost optimality within the framework of the EPBD*. Stockholm, Maggio 2011.
- [57] EEB, *Harmonized Cost Optimal Methodologies for the Energy Performance in Buildings Directive - EEB Principles to Calculate Minimum Energy Performance Requirements in Buildings*. Brussels, April 2010.
- [58] BPIE, *Cost Optimality. Discussing methodology and challenges within the recast Energy Performance of Buildings Directive*, September 2010.
- [59] Concerted Action, *Cost optimal levels for energy performance requirements - The Concerted Action's input to the Framework Methodology*, May 2011.
- [60] UNI, *UNI 10339:1995. Impianti aerulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*, 1995.
- [61] U.S. Department of Energy. [Online]. Available: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>.
- [62] UNI, *UNI/TS 11300 (serie), "Prestazioni energetiche degli edifici"*, 2008-2012.
- [63] Parlamento della Repubblica Italiana, *Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*, 2015.
- [64] Parlamento della Repubblica Italiana, *Decreto legislativo del 3 marzo 2011, n. 28. Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE*, Supplemento Ordinario n. 81 GU n. 71 del 28.3.2011.
- [65] ASHRAE, *Energy estimating and modeling methods» Cap. 32 in ASHRAE Handbook 2005 - Fundamentals (SI)*, 2005.
- [66] Evolvente, *Design Builder Software Version 3.2.0.067*.
- [67] U.S. Department of Energy, *Energy Plus simulation software (varie versioni fino alla v. 8.1)*.
- [68] D. o. E. Program, *DOE-2, Lawrence Berkeley National Laboratory, Hirsch & Associates, DOE release 2.1E, California,, 1994*.

- [69] Department of Defence, *BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics), program users manual. Volume 1: Supplement (version 3.0), Final Report Army Construction Engineering Research Lab., Champaign, IL, 1992.*
- [70] Masterclima, *MC 11300* (v. 2.25).
- [71] Siegen University, F. D. Heidt, *GAEA demo version.*
- [72] European Commission. [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.
- [73] Commission of the European Communities, *Directorate General XII for Science, Research and Development. Data sets for computer simulations of solar Energy Systems and Energy Consumptions in Buildings. Test Reference Year, Try, 1985.*
- [74] ASHRAE, *International Weather for Energy Calculations (IWECC), International Weather for Energy Calculations (IWECC Weather Files) Users Manual and CD-ROM, Atlanta, ASHRAE, 2001.*
- [75] N. R. E. L., *Typical Meteorological Year 2 (TMY2), User's Manual for TMY2s, NREL/SP-463-7668, and TMY2s, Typical Meteorological Years Derived from the 1961-1990 National Solar Radiation Data Base, Golden, Colorado, 1995.*
- [76] M. Filippi, E. Fabrizio, Guida AiCARR, *Introduzione alla simulazione termo-energetica dinamica degli edifici, Editoriale Delfino, 2012.*
- [77] E. Wurtz, F. Deque, L. Mora, E. Bozonnet, S. Trompezinsky, *SIM_ZONAL: a software to evacuate the risk of discomfort: coupling with an energy engine, comparison with CFD codes and experimental measurements. Contributo in Atti di Convegno: 8th International IBPSA Conference, Agosto 2003.*
- [78] *UNI EN ISO 13786 Prestazione termica dei componenti per l'edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo, 2008.*
- [79] *UNI 10375. Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti, 2011.*
- [80] *UNI 10344 Riscaldamento degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia, 1993.*
- [81] *UNI 10379 Riscaldamento degli edifici - Fabbisogno energetico convenzionale normalizzato, 2005.*
- [82] *UNI EN 832 Prestazione termica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento - Edifici residenziali, 2001.*

- [83] EnergyPlus documentations, *GettingStartedwith EnergyPlus, BasicConceptsManual - Essential Information YouNeed aboutRunningEnergyPlus*, October 2013.
- [84] G. A. Meehl, C. Tebaldi, *More intense, more frequent, and longer lasting heatwaves in the 21st century*, *Science* (2004) 994–997.
- [85] A. Joudi, H. Svedung, M. Cehlin, M. Rönnelid, *Reflective coatings for interior and exterior of buildings and improving thermal performance*, *Appl. Energy* (2013) 562–570.
- [86] A. Synnefa, M. Santamouris, I. Livada, *A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment*, *Solar Energy* 80 (2006) 968–981.
- [87] F. Cotana, F. Rossi, M. Filippini, V. Coccia, A.L. Pisello, E. Bonamente, A. Petrozzi, G. Cavalaglio, *Albedo control as an effective strategy to tackle Global Warming: a case study*, *Appl. Energy* 130 (2014) 641–647.
- [88] F.R. D'Ambrosio Alfano, M. Dell'Isola, B.I. Palella, G. Riccio, A. Russi, *On the measurement of the mean radiant temperature and its influence on the indoor thermal environment assessment*, *Build. Environ.* 63 (2013) 79–88.
- [89] V. Costanzo, G. Evola, A. Gagliano, L. Marletta, F. Nocera, *Study on the application of cool paintings for the passive cooling of existing buildings in Mediterranean climates*, *Adv. Mech. Eng.* 2013 (2013), Article ID 413675 (10 pp.).
- [90] Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Filippo De Rossi, G. Turni, G. Peter Vanoli, *Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning*, *Appl. Energy* 104 (2013) 845–859.
- [91] F. Ascione, N. Bianco, R.F. De Masi, F. de' Rossi, G.P. Vanoli, *Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: energy savings and indoor comfort in the cooling season*, *Appl. Energy* 113 (2014) 990–1007.
- [92] A.L. Pisello, F. Cotana, L. Brinchia, *On a cool coating for roof clay tiles: development of the prototype and thermal-energy assessment*, *Energy Proc.* 45 (2014) 453–462.
- [93] S. Barkaszi, D. Parker, *Home Energy Magazine Online* (May/June), 1994.
- [94] A. Muscio, A. Libbra, C. Siligardi, P. Tratarini, *Sviluppo di materiali ad elevata riflessione solare per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche degli edifici durante la stagione estiva*, *Report RdS/2011/146*, Modena, Italia, 2011.

- [95] C. Becchio, D. Guglielmino, E. Fabrizio, M. Filippi, *Metodologie di calcolo del fabbisogno di energia annuale per la climatizzazione: risultati a confronto*, 2009.
- [96] UNI EN 15251:2008, *Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica*.
- [97] UNI TS 11300 Parte 1: *Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*, 2014.
- [98] Certimac, *Valutazione numerica del contributo alla resistenza liminare di parete opaca verticale ed orizzontale di vernice termoriflettente a bassa emissività (UNI EN ISO 6946:2008)*, Report n° 110123-R-2522, Faenza, Italia, 2011.
- [99] E.L. Olsen, Q.Y. Chen, *Energy consumption and comfort analysis for different low-energy cooling systems in a mild climate*, *Energy Build.* (2003) 560–571.
- [100] U.S. Department of Energy, *EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140*, 2011, pp. 1–132 http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_testing.cfm.
- [101] U.S. Department of Energy, *EnergyPlus Testing with HVAC Equipment Performance Tests CE100 to CE200 from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011*, 2011, pp. 1–80 <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplustesting.cfm>.
- [102] A. Buonomano, A. Palombo, *Building energy performance analysis by an in-house developed dynamic simulation code: an investigation for different case studies*, *Appl. Energy* 133 (2014) 788–807.
- [103] Parlamento della Repubblica Italiana, *DPR 26 agosto 1993, n. 412 - Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, L. 10/91*, Supplemento ordinario in GU n. 242, del 14.10.1993.
- [104] UNI, *Determination of the Primary Energy Demand and Yields for Winter Heating and the Production of Domestic Hot Water*, UNI/TS 11300-2, 2008.
- [105] European Commission. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3930297/5968878/KS-DK-13-001-EN.PDF>.
- [106] Eurostat Data from March 2014, 2014, http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics.

- [107] European Union, *How to Develop a Sustainable Energy Action Plan (SEAP), Guidebook, Part 2*, 2010.
- [108] D. Dell'Oro, G. Masera, *Involucro efficiente in clima temperato, CDA – Riscaldamento dell'aria riscaldamento refrigerazione*, n. 6 Giugno 2008, pp. 26 – 34.
- [109] F. Ascione, L. Bellia, A. Capozzoli, F. Minichiello, *Energia solare ed involucro edilizio: incidenza delle finiture superficiali esterne e dell'inerzia termica sulle richieste energetiche nell'edilizia residenziale urbana*, 46° AICARR International Conference, Milano - Italy, 12-13 March 2008. pp. 777-798.
- [110] ISO 7730, *Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, 2005.
- [111] L. Bellia, F. De Falco, F. Minichiello, *Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates*, *Applied Thermal Engineering*, Volume 54, Issue 1, 14 May 2013, Pages 190-20. DOI:10.1016/j.applthermaleng.20.
- [112] L. Bellia, C. Marino, F. Minichiello, A. Pedace, *An Overview on Solar Shading Systems for Buildings*, *Energy Procedia*, Volume 62, 2014, Pages 309-317. DOI:10.1016/j.egypro.2014.12.392.
- [113] C. Marino, F. Minichiello, W. Bahnfleth, *The influence of surface finishes on the energy demand of HVAC systems for existing buildings*, *Energy and Buildings*, Volume 95, 15 May 2015, Pages 70-79. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.02.036.
- [114] C. Marino, F. Minichiello, *Existing Buildings and HVAC Systems: Incidence of Innovative Surface Finishes on the Energy Requirements*, *Energy Procedia*, Volume 82, December 2015, Pages 499-505. DOI:10.1016/j.egypro.2015.11.860.
- [115] O. Kaynakli, *A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 415-425. DOI:10.1016/j.rser.2011.08.006.
- [116] A. Bolatturk, *Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey*, *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 1301–1309. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2005.10.019.
- [117] J. Yu, C. Yang, L. Tian, D. Liao, *A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China*, *Applied Energy* 86 (2009) 2520-2529. DOI:10.1016/j.apenergy.2009.03.010.

- [118] A. Ucar, F. Balo, *Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls. Renewable Energy* 35 (2010) 88-94. DOI:10.1016/j.renene.2009.07.009.
- [119] M. F. Zedan, A. M. Mujahid, *An efficient solution for heat transfers in composite walls with periodic ambient temperature and solar radiation. International Journal of Ambient Energy* 14 (1993) 83-98. DOI: 10.1080/01430750.1993.9675599.
- [120] A. D. Granja, L. C. Labaki, *Influence of external surface color on the periodic heat flow through a flat solid roof with variable thermal resistance. International Journal of Energy Research* 27 (2003) 771-779. DOI: 10.1002/er.915.
- [121] N. Daouas, Z. Hassen, H. B. Aissia, *Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia, Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 319-326. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2009.09.009.
- [122] O. A. Dombayci, *The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings, Building and Environment* 42 (2007) 3855-3859. Doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.054.
- [123] K. Comakli, B. Yuksel, *Environmental impact of thermal insulation thickness in buildings, Applied Thermal Engineering* 24 (2004) 933-9440. DOI:10.1016/j.buildenv.2006.10.054.
- [124] T. M. I. Mahlia, A. Iqbal, *Cost benefits analysis and emission reductions of optimum thickness and air gaps for selected insulation materials for building walls in Maldives, Energy* 35 (2010) 2242-2250. DOI:10.1016/j.energy.2010.02.011.
- [125] A. Yildiz, G. Gurlek, M. Erkek, N. Ozbalta, *Economical, environmental analyses of thermal insulation thickness in buildings, Journal of Thermal Science and Technology* 28(2) (2008) 25-34.
- [126] M. Ozel, *Cost analysis for optimum thicknesses and environmental impacts of different insulation materials, Energy and Buildings* 49 (2012) 552-559. DOI:10.1016/j.enbuild.2012.03.002.
- [127] J. Yu, L. Tian, C. Yang, X. Xinhua, W. Jinbo, *Optimum insulation thickness of residential roof with respect to solar-air degree-hours in hot summer and cold winter zone of china, Energy and Buildings* 43 (2011) 2304-2313. DOI:10.1016/j.enbuild.2011.05.0.
- [128] F. Ascione, N. Cheche, R. F. De Masi, F. Minichiello, G. P. Vanoli, *Design the refurbishment of historic buildings with the cost-optimal methodology: The case study of*

a XV century Italian building, Energy and Buildings, Volume 99, 15 July 2015, Pages 162-176.

- [129] F. Margiotta, G. Puglisi, *Caratterizzazione del parco edilizio nazionale. Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio*, ENEA, 2009.
- [130] European Parliament, *Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) N° 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council (2012/C 115/01)*.
- [131] Parlamento della Repubblica Italiana, *DPR 2 aprile 2009, n.59, Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia*.
- [132] [http://www.designbuilder.co.uk/helpv4.2/#Generic_AHU.htm?Highlight=air to air heat](http://www.designbuilder.co.uk/helpv4.2/#Generic_AHU.htm?Highlight=air%20to%20air%20heat).
- [133] http://www.recuperator.eu/Docs/Press/newsletter_0603.pdf.
- [134] M. Santamouris, Asimakopoulus (a cura di), *Passive cooling of Buildings*, London: James & James, 1996.
- [135] U. Wienke, *L'edificio passivo. Standard, requisiti, esempi*, Alinea Editrice, 2002.
- [136] A. Capozza, M. De Carli, A. Galgaro, A. Zarrella, *Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore*, RSE Ricerca Sistema Energetico, 2012.
- [137] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, *Fundamentals of Heat Transfer*, New York, 1981.
- [138] A. Mohamed, K. Hasan and Sirén, *Fulfilment of net-zero energy building (NZEB) with four metrics in a single family house with different heating alternatives*. *Applied Energy* 2014; 114: 385-399.
- [139] I. Sartori, A. Napolitano, K. Voss, *Net zero energy buildings: A consistent definition framework*. *Energy and Buildings* 2012; 48: 220-232.
- [140] C. Becchio, P. Dabbene, E. Fabrizio, V. Monetti, M. Filippi, *Cost optimality assessment of a single family house: Building and technical systems solutions for the nZEB target*. *Energy and Buildings* 2015; 90: 173-187.
- [141] K. Voss, E. Musall, *Net zero energy buildings – International projects of carbon neutrality in buildings*. Detail green books, München, 2013.

- [142] G. Evola, G. Margani, L. Marletta, *Cost-effective design solutions for low-rise residential Net ZEBs in Mediterranean climate. Energy and Buildings* 2014; 68: 7-18.
- [143] S. A. Al-Sanea, M. F. Zedan, S. N. Al-Hussain, *Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential. Applied Energy* 2012; 89: 430-442.
- [144] D. Kolokotsa, D. Rovas, E. Kosmatopoulos, K. Kalaitzakis, *A road map towards intelligent net zero and positive energy buildings. Solar Energy* 2011; 85: 3067-3084.
- [145] H. Poirazis, A. Blomsterberg, M. Wall, *Energy simulations for glazed office buildings in Sweden. Energy and Buildings* 2008; 40: 1161-1170.
- [146] I. Susorova, M. Tabibzadeh, A. Rahman, H. L. Clack, M. Elnimeiri, *The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings. Energy and Buildings* 2013; 57: 6-13.
- [147] A. J. Marszal, P. Heiselberg, *Life cycle cost analysis of a multi-storey residential Net Zero Energy Building. Energy* 2011; 36: 5600-5609.
- [148] L. Wang, J. Gwilllham, P. Jones, *Case study of zero energy house design in UK. Energy and Buildings* 2009; 41: 1215-1222.
- [149] M. Thalfeldt, E. Pikas, J. Kurnitski, H. Voll, *Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate. Energy and Buildings* 2013; 67: 309-321.
- [150] E. Pikasn, M. Thalfeldt, J. Kurnitski, *Cost optimal and nearly zero energy building solutions for office buildings. Energy and Buildings* 2014; 74: 30-42.
- [151] A. Buonomano, G. De Luca, U. Montanaro, A. Palombo, *Innovative technologies for NZEBs: An energy and economic analysis tool and a case study of a non-residential building for the Mediterranean climate. Energy and Buildings* Available online 22 August 2015.
- [152] UNI EN 15603:2008, *Prestazione energetica degli edifici - Consumo energetico globale e definizione dei metodi di valutazione energetica.*
- [153] L. A. Piterà, *Determinazione della prestazione energetica per la classificazione dell'edificio, Aicarr Journal* 19; 56-60.
- [154] E. Rodriguez-Ubinas, C. Montero, M. Porteros, S. Vega, I. Navarro, M. Castillo-Cagigal, E. Matallanas, A. Gutiérrez, *Passive design strategies and performance of Net Energy Plus Houses. Energy and Buildings* 2014; 83: 10-22.

- [155] F. Ascione, R. F. De Masi, F. De Rossi, M. Sasso, G. P. Vanoli, *Analysis and diagnosis of the energy performance of buildings and districts: Methodology, validation and development of Urban Energy Maps*, *Cities* 2013; 35: 270-283.
- [156] Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Rosa Francesca De Masi, Filippo De Rossi, GPeter Vanoli, *Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season*, *Applied Energy* 2014; 113: 990-1007.
- [157] Domenico Mazzeo, G Oliveti, M De Simone, N Arcuri, *Analytical model for solidification and melting in a finite PCM in steady periodic regime*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Volume 88, September 2015, Pages 844–861, September 2015.
- [158] F. Ascione, L. Bellia, P. Mazzei, F. Minichiello, *Solar gain and building envelope: the surface factor*. *Building Research & Information* 2010; 38(2): 187–205.
- [159] C. R. Ruivo, Giovanni Angrisani, Francesco Minichiello, *Ruivo C.R, Angrisani G and Minichiello F. Influence of the rotation speed on the effectiveness parameters of a desiccant wheel: an assessment using experimental data and manufacturer software*. *Renewable Energy* 2015; 76: 484-493.
- [160] L. Bellia, A. Pedace, F. Fragliasso, *Dynamic daylight simulations: Impact of weather file's choice*. *Solar Energy* 2015; 117: 224-235.
- [161] F. Ascione, D. D'Agostino, C. Marino, F. Minichiello, *Net Zero Energy Buildings for Mediterranean Climates. Atti del Convegno internazionale "ASME-ATI-UIT 2015 Conference on thermal energy systems: production, storage, utilization and the environment"*, Naples, Italy, May 17-20, 2015, ISBN: 978-88-98273-17-1..
- [162] *Official Journal of the European Union* 55, April 2012; C 115/ 10.
- [163] F. Ascione, L. Bellia, F. Minichiello, *Earth-to-air heat exchangers for Italian climate*. *Renewable Energy* 2011; 36: 2177-2188.